



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KUVADATAN KERÄYSLAITTEISTON SUUNNITTELU JA TESTAUS

Toni Tolonen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Kuvadatan keräyslaitteiston suunnittelu ja testaus

Toni Tolonen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 81 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: yliopistonlehtori, TkT Toni Liedes ja DI Antti Tikanmäki

Tässä diplomityössä suunnitellaan, kehitetään ja testataan kuvadatan keräyslaitteisto, jolla on tarkoitus helpottaa kuvien keräystä eri viljalajikkeista. Kerättyä kuvadataa tarvitaan erityisesti konenäköön liittyvien järjestelmien opetuksessa. Lisäksi työssä tutustutaan prototyyppien suunnittelun ja valmistuksen periaatteisiin.

Työn teoriaosassa käydään läpi julkaisuja ja tutkimuksia liittyen jyvien koneoppimis pohjaiseen luokitteluun. Teoriaosassa perehdytään myös koneensuunnittelun ja materiaalin käsittelyn, sekä automaatiojärjestelmien perusperiaatteisiin. Teoriaosa muodostaa pohjan järjestelmän suunnitteluvaiheelle, jossa käytetään tuotekehitysprosessin perusperiaatteita. Suunnitteluvaiheessa laitteiston rakenteesta ja toiminnasta laaditaan luonnoksia ja sille määritellään vaatimuslista. Laitteiston eri osakomponentit valitaan ja tarpeen mukaan valmistetaan haluttujen vaatimusten mukaisesti. Laitteiston ohjaukseen suunnitellaan ja kasataan myös automaatiojärjestelmä ja käyttöliittymä.

Työssä kehitetty järjestelmä kykenee ottamaan automaattisesti kuvia eri jyvälajikkeista ja laitteiston suorituskyky onnistuttiin saamaan tavoitteisiin nähden riittäväksi. Laitteistolla otettiin 5000 kuvan testisarjat kaurasta, vehnästä, rukiista ja ohrasta. Kerätyn kuvadatan todettiin sopivan konenäköalgoritmien opetukseen.

Asiasanat: automaatio, konenäkö, koneensuunnittelu, viljateollisuus

ABSTRACT

Design and testing of an image data acquisition equipment

Toni Tolonen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2021, 81 pp.

Supervisor(s) at the university: University Lecturer, D.Sc. (Tech.) Toni Liedes and M.Sc. (Tech.) Antti Tikanmäki

In this thesis, image data acquisition equipment is designed, developed and tested, which is intended to ease the collection of image data from different cereal varieties. The collected image data is especially needed in the teaching of systems related to machine vision. In addition, the principles of design and manufacture of prototypes are introduced.

The theoretical part of the thesis reviews publications and studies related to the machine-learning-based classification of grains. The theoretical part also introduces the basic principles of machine design and material handling, as well as automation systems. The theoretical part forms the basis for the system design phase, which uses the basic principles of the product development process. In the design phase, drafts of the equipment and functions are made, and a list of requirements is defined for it. The various components of the equipment are selected and, if necessary, manufactured according to the desired requirements. An automation system and user interface to control the equipment are also designed and assembled.

The system developed in the thesis can automatically take pictures of different cereal varieties and the performance of the equipment was managed to get sufficient for the goals. Test sets of 5000 images of oats, wheat, rye and barley were taken with the equipment. The collected image data was found to be suitable for teaching machine vision algorithms.

Keywords: automation, computer vision, machine design, cereal industry

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Oulun yliopiston biomimetikan ja älykkäiden järjestelmien tutkimusyksikössä (BISG) vuosien 2020 ja 2021 aikana.

Haluan kiittää professori Juha Röningiä, joka mahdollisti tämän diplomityön tekemisen ja työskentelyni Oulun yliopistolla. Kiitokset Antti Tikanmäelle työn käytännön ohjauksesta ja opastuksesta työhön liittyvissä asioissa. Suuret kiitokset myös muille BISG-tutkimusyksikön jäsenille saamastani avusta työhön liittyviin asioihin. Haluan kiittää myös ohjaajaani Toni Liedestä saamastani ohjauksesta ja avusta työn toteutukseen liittyviin asioihin. Lisäksi kiitokset myös Oulun yliopiston FAB-Labin ja pajan henkilökunnalle.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani ja perhettäni, sekä ystäviäni saamastani tuesta työn ja opintojen aikana.

Oulu, 7.12.2021

Toni Tolonen
Toni Tolonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 ESIMERKKEJÄ KUVAUSLAITTEISTOISTA JA -TUTKIMUKSISTA.....	9
2.1 Tutkimuksia kappaleiden optisesta lajittelusta ja luokittelusta.....	9
2.2 Elintarviketeollisuuden lajittelulaitteet	12
3 KONEENSUUNNITTELUN JA VALMISTUKSEN PERIAATTEITA.....	14
3.1 3D-tulostus	18
4 MATERIAALINKÄSITTELY	21
4.1 Kuljettimet.....	21
4.1.1 Hihnakuuljetin	22
4.1.2 Ruuvikuuljetin	23
4.1.3 Tärykuuljetin.....	25
4.2 Säiliöt	26
5 AUTOMAATIO.....	27
5.1 Teollisuuden ohjausjärjestelmät.....	27
5.2 Sulautetut järjestelmät ja mikro-ohjaimet	28
5.3 Logiikoiden ohjelmointi.....	28
5.4 Konenäkö	29
5.4.1 Konenäköjärjestelmän yleisiä suunnitteluperiaatteita	30
5.4.2 Kamerate konenäköjärjestelmissä	32
5.4.3 Valaistus konenäköjärjestelmissä	35
5.5 Sähkömoottorit ja niiden ohjaus.....	35
5.5.1 Oikosulkumoottorit.....	36
5.5.2 Kestomagneettimoottorit	36
5.5.3 Taajuusmuuttajat.....	36
5.5.4 Servomoottorit	37
5.5.5 Askelmoottorit	37
5.5.6 DC-moottorit.....	38
6 JYVIEN KUVAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS	39
6.1 Laitteiston suunnittelu	39

6.1.1 Kuvattavat kappaleet	40
6.1.2 Luonnostelu	42
6.1.3 Vaatimuslista	45
6.1.4 Toimintorakenne.....	47
6.1.5 Osatoimintojen ratkaisuperiaatteet	49
6.2 Käytettävät komponentit	50
6.2.1 Kuljettimet	51
6.2.2 Runko.....	60
6.2.3 Kuvauskomponentit.....	61
6.2.4 Sähkö- ja automaatiojärjestelmä.....	63
6.3 Kokoonpano	66
6.4 Ohjausohjelma.....	68
7 TESTAUS, TULOKSET JA KEHITYSKOhteet	72
8 YHTEENVETO	77
9 LÄHDELUETTELO.....	79

MERKINNÄT JA LYHENTEET

β	objektiivin suurennus
a	objektiivin etäisyys kuvattavasta kappaleesta
AC	vaihtovirta (alternating current)
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (computer-aided design)
CCD	kameran kennotyyppi (charge coupled device)
CMOS	kameran kennotyyppi (complementary metal–oxide–semiconductor)
DC	tasavirta (direct current)
f'	polttoväli
FBD	logiikkakaavio (function block diagram)
FFF	3D-tulostusmenetelmä (fused filament fabrication)
FOV	kameran näkökenttä (field of view)
FPGA	ohjelmoitava porttimatriisi (field-programmable gate array)
GigE	Gigabit-Ethernet
IL	instruktiolista (instruction list)
IPC	teollisuustietokone (industrial-PC)
LD	tikapuukaavio (ladder diagram)
MCU	mikro-ohjain (microcontroller unit)
N_f	pikselien määrä pienimmän yksityiskohdan kuvaamiseen
PLA	polylaktidi (polylactic acid)
PLC	ohjelmoitava logiikkaohjain (programmable logic controller)
PoE	Ethernet-virransyöttö (power over Ethernet)
PWM	pulssinleveysmodulaatio (pulse-width modulation)
R_c	kennon pysty- tai vaakaresoluutio
R_s	kennon erottelukyky
s	kennon koko
S_f	kuvattavan kappaleen pienimmän yksityiskohdan koko
SFC	sekvenssikaavio (sequential function chart)
SLA	3D-tulostusmenetelmä (stereolithography apparatus)
ST	strukturoidu teksti (structured text)
VDC	tasajännite (volts of direct current)

1 JOHDANTO

Konenäkö on esimerkki tekoälytutkimuksen ja koneoppimisen sovelluskohteista. Nykyisin konenäköä käytetään laajalti erilaisissa käyttökohteissa ja sillä onkin ollut erittäin suuri vaikutus eri teollisuus- ja toimialoille. Konenäkö mahdollistaa toimintojen automatisoinnin, joissa normaalisti tarvittaisiin ihmisen näkökykyä, joten tällaisia tehtäviä ja ongelmia löytyy käytännössä loputtomasti eri toimialoilta. Konenäön ja automaattisten koneiden yhdistelmällä voidaan toteuttaa järjestelmiä, jotka suorittavat esimerkiksi ihmiselle yksitoikkoisia tai raskaita tehtäviä. Konenäköä hyödynnetäänkin muun muassa automaattivarastoissa, joissa kappaleita lasketaan, tunnistetaan ja lajitellaan (Azadeh ym. 2019). Myös nykyaikainen itseajava auto on hyvä esimerkki konenäköä käyttävistä koneista. Itseajavassa autossa käytetään monenlaisia kameroita ja antureita, joilla tuotetun datan perusteella auto määrittää esimerkiksi oman paikkansa ja asentonsa ympäristön suhteen (Badue ym. 2021).

Nykyisin erilaisiin neuroverkkoihin perustuvien menetelmien käyttö on suosittua koneoppimisen tutkimuksissa ja sovelluksissa. Neuroverkkoihin perustuvat koneoppivat järjestelmät vaativat kunnolla toimiakseen paljon opetusdataa ja tässä yhteydessä puhutaankin usein datalähtöisestä koneoppimisesta. Tällä ratkaisumallilla on toteutettu esimerkiksi internetin kuvahakukoneet. (Pietikäinen & Silvén 2019, s. 68-75)

Tässä työssä suunnitellaan ja valmistetaan laitteisto, jolla kerätään kuvadataa ja testataan erilaisia konenäköön liittyviä komponentteja, kuten kameroita. Kuvattavia kappaleita ovat erilaiset erityisesti Suomessa kasvatettavat jyvät, esimerkiksi vehnä ja kaura. Alkuperäinen idea työhön tuli maatalouden puolelta. Myllylle tulevista jyväeristä otetaan näytteitä, joista tarkastetaan jyvien laatu ja onko jyväerässä mukana muita lajeja. Tämä on erityisen tärkeää gluteenittomiin tuotteisiin käytettävän kauran tapauksessa. Jyvänäytteiden tarkastus toteutetaan tyypillisesti manuaalisesti, eli työntekijä tarkastaa näytteet silmäääräisesti käsityönä. Näytteiden tarkastus on erittäin yksitoikkoinen tehtävä, mutta se vaatii kuitenkin huolellisuutta ja tarkkuutta. Jyvänäytteiden automaattiselle tarkastuslaitteelle on siis selkeä tarve.

Työhön sisältyvät laitteiston konseptin ja toiminnan suunnittelu, mekaniikkasuunnittelu, komponenttien valinta ja prototyypin valmistus sekä testaus. Työn toteutus aloitetaan ke-

räämällä teoriapohjaa, jota voidaan käyttää laitteiston suunnittelun tukena. Aluksi tutustutaan jyvien konenäköpohjaisista luokittelijoista julkaistuihin esimerkkitutkimuksiin ja erityisesti niissä käytettyihin koejärjestelyihin, minkä lisäksi käydään läpi lyhyesti yleisesti elintarviketeollisuudessa käytössä olevien lajittelulaitteiden rakennetta ja toimintaperiaatteita. Teoriaosuudessa käydään läpi koneensuunnittelun ja valmistuksen periaatteita. Valmistusmenetelmissä käydään läpi pikavalmistuksen ja erityisesti 3D-tulostuksen teoriaa. Materiaalienkäsittelyn teoriaosassa tutustutaan laitteistossa käytettyjen hihna-, ruuvi- ja tärykuljettimien suunnitteluun liittyviin asioihin. Laitteisto on toiminnaltaan automaattinen, joten järjestelmän suunnittelun tueksi käydään läpi myös automaatioon liittyviä asioita, kuten ohjausjärjestelmiin, konenäköön ja sähkömoottoreihin liittyvää teoriaa.

Työn käytännön osassa esitellään aluksi laitteiston suunnittelun vaiheet. Koneensuunnitteluprojektin mukaisesti suunnittelussa tehdään ensimmäisenä ns. esitutkimus, joka on tässä työssä toteutettu pitkälti teoriaosuuden muodossa. Suunnitteluvaiheessa kuvataan yksityiskohtaisesti laitteiston luonnostelua ja järjestelmälle laaditaan suunnittelun vaatimuslista ja toimintorakennekaavio. Laitteiston osatoiminnoille valitaan sopivat ratkaisuperiaatteet, jonka jälkeen tehdään lopulliset komponenttivalinnat. Laitteistoon valmistetaan hihna- ja tärykuljetin, sekä ruuvisyötin. Laitteistossa käytetään alkuvaiheessa teollisuuskameraa, jolla kerätään myös ensimmäiset kuvadatapaketit. Laitteiston automaatio toteutetaan Beckhoffin komponenteilla ja järjestelmän peruskäyttöliittymä tehdään Beckhoffin TwinCAT-ohjelmistolla. Laitteistossa käytetyt osat sijoitetaan lopuksi omille paikoilleen alumiiniprofiilista kasattuun runkoon.

Laitteiston lopullisessa testivaiheessa eri komponenttien parametrit säädetään kohdilleen ja laitteistolla kerätään ensimmäiset kuvadatapaketit vehnästä, ohrasta, kaurasta ja ruukiista, jotka kukin sisälsivät noin 5000 kuvaa. Lopuksi kerätty testikuvat annetaan eteenpäin konenäköluokittelijoiden opetuksen testaamiseen.

2 ESIMERKKEJÄ KUVAUSLAITTEISTOISTA JA -TUTKIMUKSISTA

Jyvien ja muiden pienten kappaleiden lajitteluun on kehitetty monenlaisia laitteita ja lajittelusta konenäön avulla on tehty monia erilaisia tutkimuksia. Tässä kappaleessa käydään läpi lyhyesti esimerkkitutkimuksia ja niistä saatuja tuloksia, sekä yleisellä tasolla kaupallisten lajittelulaitteiden rakennetta ja toimintaperiaatetta. Tarkastelussa kiinnitetään erityistä huomiota lajittelu- ja kuvauslaitteiden mekaaniseen puoleen ja käytettyihin komponentteihin. Tarkastelun tavoitteena on saada ideoita ja alustavaa teoriapohjaa kuvauslaitteiston suunnitteluun, sekä tuntumaa sille, mitä komponentteja laitteistoon mahdollisesti tarvitaan.

2.1 Tutkimuksia kappaleiden optisesta lajittelusta ja luokittelusta

Pearsonin ym. (2008) tutkimuksessa kehitettiin vehnälajittelulaite, jolla eroteltiin värin perusteella ”punaiset” ja ”valkoiset” vehnälajikkeet toisistaan. Laitteessa käytettiin The Imaging Sourcen CCD-kameraa, johon oli kiinnitetty Computarin 25 mm objektiivi. Kameran liipaisuun käytettiin Banner Engineeringin valoanturia ja kuvat valaistiin kahdella 35 W halogeenilampulla. Kameran suljinajaksi oli asetettu 1/6875 s. (Pearson ym. 2008)

Pearsonin laitteessa jyvät syötettiin Seedburo 3010FC/B-annostelulaitteella FMS-Syntron F-TO-C-tärykuljettimelle. Seedburon annostelulaite on rakenteeltaan pienikokoinen ruuvisyötin. Tärykuljettimessa käytettiin 15 cm pituista V-mallista kaukaloa, josta jyvät putosivat alumiiniseen V-malliseen liukukouruun, jonka tarkoituksena oli erotella jyvät irti toisistaan. Valoanturi oli sijoitettu liukukourun yhteyteen ja sillä mahdollistettiin jyvän osuminen kuvan keskelle noin millimetrin tarkkuudella. Liukukourun päähän oli sijoitettu kaksi toisiinsa nähden 90 asteen kulmaan asetettua peiliä, joiden kohdalla jyvistä otettiin kuvat. Peileillä mahdollistettiin koko jyvän kuvaus eri puolilta yhdellä kertaa. Kuvien ottamisen, analysoinnin ja luokittelun jälkeen laite erotteli valkoiset jyvät erilliseen säiliöön paineilmatoimisen läpän avulla. (Pearson ym. 2008)

Lajittelulaitteen luokittelija opetettiin 200 kuvalla kummastakin vehnälajikkeesta, jolloin opetus aika oli noin 5 minuuttia opetusaineistoa kohden. Luokittelija analysoi jyviä kolmen piirteen perusteella. Luokittelija testattiin erillisellä tarkistuskuvasarjalla ja sen tark-

kuudeksi saavutettiin vähintään 86 %. Laite kykeni erottelemaan eri jyvälajikkeet toisistaan noin 95 % tarkkuudella nopeudella 30 jyvää/s. Korkeammalla lajittelunopeudella 45 jyvää/s laitteen erottelutarkkuus laski noin 12 %. (Pearson ym. 2008)

Pearsonin jatkotutkimuksessa (2009) lajittelulaitteesta kehitettiin uusi versio, jolla kuvattiin vehnää ja paahtomaissia. Kuvien ottamiseen käytettiin kolmea erikoisvalmistettua kuvausyksikköä, joiden tärkeimpinä komponentteina olivat Kodakin CMOS-kenno ja Alteran Cyclone FPGA-piiri. Kuvausyksiköissä käytettiin Marshall Electronicsin miniobjektiivieja. Kuvausyksiköt oli asennettu teräksestä valmistetulle kehälle 120 asteen päähän toisistaan. Kehälle oli asennettu myös kuusi kappaletta 20 W halogeenilamppuja. (Pearson 2009)

Pearsonin luokittelijan opetuksessa viallisista paahtomaissin jyvistä otettiin 100 kuvaa ja tavallisista, terveistä jyvistä 1000 kuvaa. Vehnänäytteille tehtiin samankaltaiset opetusarjat. Laite kykeni erottelemaan huonot maissin jyvät noin 75 % tarkkuudella ja vehnän lajittelutarkkuus oli noin 90 %. Laitteen lajittelunopeus, 75 jyvää/s, oli huomattavasti suurempi, kuin aiemmassa tutkimuksessa. (Pearson 2009)

Blascon ym. (2009) tutkimuksessa kehitettiin laitteistoa ja menetelmiä granaattiomenan siementen tarkastukseen. Tutkimuksessa käytetyssä käsittelykoneessa siemenet syötettiin tärysyöttimellä kuudelle hihnakuljettimelle, joissa siementen kuvaus ja lajittelu suoritettiin. Hihnat olivat 30 mm leveitä ja niiden nopeus oli 0,75–1,25 m/s. Siemeniä kuvattiin kahdella kameralla ja jokainen hihna valaistiin kahdella 40 W loisteputkella. Laitteiston luokittelija kykeni opetuksen jälkeen lajittelemaan siemenet noin 90 % tarkkuudella testisarjaa käsiteltäessä. Laitteisto testattiin teollisessa käytössä ja sillä saavutettiin käyttö-tarkoitukseen tarvittava suorituskky. Laite kykeni käsittelemään jopa 75 kg siemeniä tunnissa. (Blasco ym. 2009)

Guevara-Hernandezin ja Gomez-Gilin (2011) tutkimuksessa esiteltiin konenäköjärjestelmä, joka luokittelee kohteita kahteen luokkaan. Kehitettyä järjestelmää käytettiin vehnän ja ohran luokitteluun. Kuvadata kerättiin tavallisella BenQ:n digitaalikameralla ja valaistus toteutettiin 20 W pöytävalaisimella. Jyvät kuvattiin valkoisella taustalla ja valaisin asetettiin suoraan jyvien yläpuolelle, jolloin kuviin tuli mahdollisimman vähän varjoja. Kameran objektiivi asetettiin 25 cm päähän jyvistä. Järjestelmän opetukseen otettiin vehnästä ja ohrasta 10 kappaletta 60 jyvää sisältäviä kuvia. Testaukseen otettiin 10 kuvaa,

joissa oli sekaisin kumpaakin viljalajiketta. Kuvat olivat JPEG-formaatissa ja niiden resoluutio oli 5 megapikseliä. Tutkimuksessa onnistuttiin kehittämään luokittelija, joka kykeni erottamaan vehnän ja ohran toisistaan jopa yli 99 % tarkkuudella käyttämällä pelkästään kolmea piirrettä. Tutkimuksen päätelmissä todettiin, että suurempi piirremäärä lisää laskentatehon tarvetta ja saattaa jopa huonontaa luokittelijan tarkkuutta. (Guevara-Hernandez & Gomez-Gil 2011)

Tietyillä viljalajikkeilla voi olla huomattavan monia eri laatuja, jotka halutaan erottaa toisistaan. Zapotocznyn (2011) tutkimuksessa kerättiin kuvadataa 11 eri vehnälaadusta, jonka perusteella opetettiin luokittelija pelkästään vehnän tarkasteluun. Vehnänäytteet koostuivat kolmen vuoden aikana kerätyistä talvi- ja kevätlajikkeista, ja niitä tarkasteltiin eri kosteuspitoisuuksilla. Kuvadatan keräys toteutettiin Epson Perfection -skannerilla. Jokaisesta näytetyypistä otettiin 12 skannausta, joissa kussakin oli 552 jyvää. Kuvadata jaettiin eri värikanaviin, joita luokittelija analysoi. Tutkimuksen tuloksena kehitettiin menetelmä, jolla voidaan opettaa jopa 100 prosentin tarkkuudella toimiva luokittelija eri vehnälajikkeille. (Zapotoczny 2011)

Mebatsionin ym. (2013) julkaisussa tutkittiin eri viljalajikkeiden luokittelua erilaisten piirteiden perusteella. Tutkimuksessa keskityttiin viiteen tavalliseen jyvälajikkeeseen, joista kootut näytteet oli kerätty kolmelta eri käsittelylaitokselta. Jyvät kuvattiin Sonyn CCD-värikameralla, johon oli liitetty 10–120 mm säädettävä objektiivi. Kuvausjärjestelmässä käytettiin myös kameranohjaus- ja kuvankaappauskortteja. Jyvät valaistiin 32 W rengasloisteputkivalaisimella, joka oli sijoitettu heijastinkammioon. Kuvausalusta oli väritään musta ja siinä kuvattiin kuusi jyvää kerrallaan. Kuvaustilanteessa jyvät eivät koskettaneet toisiaan, millä helpotettiin jyvien reunojen havaitsemista. Kuusi jyvää sisältäviä opetuskuvia otettiin jokaisesta tutkittavasta lajikkeesta noin 5000–7500 kappaletta. Opetuskuvien lisäksi tutkimuksessa oli otettu 2500–4000 kuvaa, joita käytettiin luokittelijan testisarjana. Opetuskuvadatasta muodostettiin erilaisia jyvien luokittelijoita, jotka tarkastelivat esimerkiksi jyvien muotoon ja väriin liittyviä piirteitä. Eri luokittelijoiden pohjalta muodostettiin luokittelijayhdistelmä, joka tarkasteli valittuja piirteitä ja saavutti yli 98 % luokittelutarkkuuden. (Mebatsion ym. 2013)

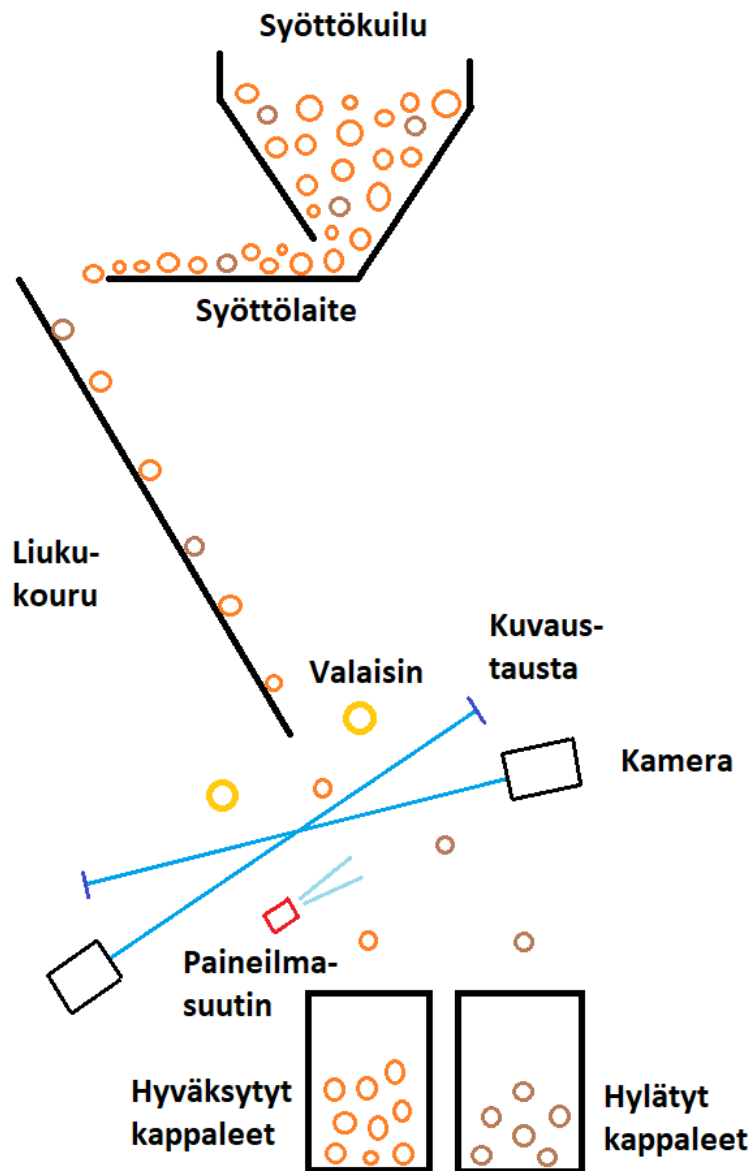
Sabancin ym. (2017) tutkimuksessa kehitettiin luokittelija, joka erottaa durumvehnän normaalista leipävehnästä. Vehnänjyvät kuvattiin Logitechin 15 megapikselin CCD Full-

HD-kameralla ja valaisu toteutettiin LED-nauhalla. Kamera oli asennettu 35 cm korkeudelle kuvausalustasta. Kamera, valaisin ja kuvausalusta olivat sijoitettuna suljettuun laatikkoon. Luokittelijan opetukseen käytettävä piirredata kerättiin ottamalla kuvat 100 leipävehnänjyvistä ja 100 durumvehnänjyvistä. Kuvien käsittelyyn käytettiin Matlab-ohjelmistoa. Luokittelija opetettiin 180 jyvän kuvalla ja se testattiin 20 kuvalla, jotka oli otettu erilleen opetusdatasta. Lopulliseksi luokittelutarkkuudeksi saavutettiin yli 99 %. (Sabanci ym. 2017)

2.2 Elintarviketeollisuuden lajittelulaitteet

Elintarviketeollisuudessa on käytössä monenlaisia lajittelulaitteita, joilla pyritään parantamaan tuotteiden laatua esimerkiksi poistamalla epätoivottuja kappaleita tuotteiden seasta. Teollisuuden lajittelulaitteiden toiminta voi perustua esimerkiksi kappaleiden erilaisiin tiheyksiin, painoon tai mekaanisiin ominaisuuksiin. Nykyisin on olemassa myös tehokkaita ja tarkkoja optisia lajittelulaitteita, jotka kykenevät erottamaan erilaiset kappaleet toisistaan esimerkiksi värin, koon tai muodon perusteella. Elintarviketeollisuudessa käsiteltävien bulkkituotteiden määrät ovat suuria, minkä vuoksi myös lajittelulaitteet ovat yleensä kookkaita. Tuotteiden tarkastukseen on kuitenkin olemassa myös pienempiä, erityisesti laboratoriokäyttöön suunniteltuja lajittelulaitteita.

Eri valmistajien pienille kappaleille tarkoitetut optiset lajittelulaitteet ovat yleisesti rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin samankaltaisia. Kuvassa 1 on esitetty monissa lajittelulaitteissa käytetty toimintaperiaate. Lajiteltavat kappaleet syötetään laitteen syöttökuiluun, josta ne puretaan syöttölaitteella liukukouruun tai muulle kuljettimelle. Syöttölaite on usein tärysytin. Liukukourusta kappaleet putoavat laitteen kuvausosaan, jossa kappaleista otetaan kuvia ja joiden perusteella laite luokittelee kappaleet hyväksytyiksi tai hylätyiksi. Välittömästi kuvausosion yhteydessä sijaitsee toimilaite, jolla putoavat kappaleet ohjataan ”hyväksytty”- tai ”hylätty”-kuiluihin. Yleensä tähän tarkoitukseen käytetään paineilmasuuttimia tai -viuhkoja. Lajittelulaitteissa on yleensä rinnakkain useita edellä mainitun kaltaisia kanavia, jolloin laitteen käsittelykapasiteetti saadaan halutun suuriseksi. (Cimbria 2021)



Kuva 1. Lajittelulaitteiden toimintaperiaate.

Optisissa lajittelulaitteissa käytetään erilaisia kameroita, jotka valitaan kuvattavien kappaleiden ja tarkasteltavien piirteiden perusteella. Yleisiä kameratyyppejä ovat erilaiset CCD-kamerat, jotka voivat olla yksivärisiä, kaksivärisiä tai täyden väriskaalan versioita. Lisäksi laitteissa voidaan käyttää myös infrapunakameroita. Kuvattavat kappaleet valaistaan yleensä LED-valaisimilla. (Cimbria 2021; Satake Europe 2021; Bühler 2021; Elica ASM 2021)

3 KONEENSUUNNITTELUN JA VALMISTUKSEN PERIAATTEITA

Koneensuunnittelussa hyvänä pohjana ja lähtökohtana voidaan pitää järjestelmällisen tuotekehitysprosessin teoriaa, jota noudattamalla suunnittelutyö etenee luontevasti. Tuotekehitystoiminnasta löytyy tietoa esimerkiksi koneensuunnittelun käsikirjoista. Tässä kappaleessa käytetään lähteenä hieman vanhempaa koneensuunnittelun käsikirjaa, mistä ei kuitenkaan ole haittaa, sillä perussuunnitteluperiaatteet eivät ole muuttuneet juurikaan vuosien saatossa. Tuotekehityksen teorian tarkastelun lisäksi kappaleen lopussa käydään läpi lyhyesti myös pikavalmistukseen ja 3D-tulostukseen liittyviä asioita.

Tuotekehitysprosessi alkaa esitutkimuksesta, jossa suunnitellaan tuoteohjelma ja määritellään tuotekehitystehtävä. Tuoteohjelmassa on tarkoituksena löytää sopivia tuoteideoita, joille on pysyvä tarve ja kysyntä. Ideoiden haussa ja valinnassa voidaan käyttää monia eri tietolähteitä. Ulkoisia tietolähteitä ovat esimerkiksi lehtiartikkelit, tuotemessut ja tutkimuslaitokset. Usein tietolähteinä ovat yrityksen sisäiset informaatiolähteet, esimerkiksi tuloslaskelmat ja asiakasraportit. Ideoinnissa on otettava huomioon myös lait, normit ja standardit, sekä olemassa olevat patentit ja patenttihakemukset. Tuotekehitystehtävässä täydennetään informaatioltaan usein puutteellinen tuoteidea. Tuoteideasta laaditaan tuotekehitysehdotus, jonka perusteella voidaan päättää jatkotoimenpiteistä. Tuotekehitysehdotus sisältää kehitettävän tuotteen kuvauksen, tekniset ja taloudelliset vaatimukset, käytettävän kehityspanoksen ja aikataulun. (Airila ym. 1985, s. 14-16)

Kun tuotteesta on tehty tuotekehityspäätös, aloitetaan tuotekehitysprosessissa seuraavana luonnosteluvaihe. Tuotekehityspäätös tulisi laatia siten, että tehtävän ratkaisun rajat pysyisivät väljinä, mikä auttaa suunnittelijaa löytämään optimiratkaisuja ja keksimään ennakkoluulottomia ideoita. Luonnosteluvaiheen päätarkoitus onkin löytää mahdollisimman monia erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja kehitettävälle tuotteelle. Luonnosteluvaiheessa tehdyistä suunnitelmista ei vielä tehdä tarkkoja piirustuksia, vaan usein luonnokset ovat esimerkiksi käsivaralta piirrettyjä tuotteen toimintaperiaatteita kuvaavia hahmotelmia. Luonnostelun yhtenä tärkeimpänä tavoitteena on selvittää suunniteltavan tuotteen tehtävän ydin ja sisältykö tehtävään millaisia etukäteen asetettuja rajoituksia. Tuotteen tulee vastata asiakkaiden toivomuksia ja kehitettävän tuotteen myyntiargumentit on selvitettävä. Lisäksi suunniteltavaa tuotetta voidaan verrata jo kehitettyihin omiin tuotteisiin ja niiden heikkouksiin ja vahvuuksiin. Suunnittelussa on myös otettava vielä huomioon alan

yleinen tekninen taso, normit, määräykset, standardit ja yhteiskunnallinen kehityssuunta. Kun kaikki edellä olevat asiat on selvitetty, voidaan laatia tavoitteet ja vaatimukset kehitettävälle tuotteelle. (Airila ym. 1985, s. 17-18)

Tuotteelle asetettu vaatimuslista toimii suunnittelutyön lähtökohtana. Vaatimuslistaa käytetään koko työn aikana ja sitä onkin päivitettävä ja pidettävä ajan tasalla esimerkiksi markkinoiden muuttumisen takia. Tuotteen vaatimuslista on muodoltaan vapaa, mutta se voidaan jaotella esimerkiksi kiinteisiin ja vähimmäisvaatimuksiin, sekä toivomuksiin. Kiinteät vaatimukset ovat tärkeitä ominaisuuksia, jotka täytyy täyttää kaikissa tilanteissa, esimerkiksi normit, määräykset ja laatuvaatimukset. Vähimmäisvaatimukset ovat ominaisuuksia, jotka tulee täyttää, mutta kustannustekijöiden salliessa ne olisivat suositeltavaa ylittää. Vähimmäisvaatimuksia ovat esimerkiksi hyötysuhde ja melutaso. Kehitettävälle tuotteelle asetetut toivomukset pyritään täyttämään mahdollisuuksien mukaan. Lisätoivomukset aiheuttavat yleensä sallittuja, mutta rajoitettuja lisäkustannuksia. Toivomuksia voivat olla esimerkiksi muotoiluun ja ergonomiaan liittyvät seikat. (Airila ym. 1985, s. 18)

Kun tuotteen kehityksessä on tehty esitutkimusta, luonnosteluja ja tuotteen vaatimukset ovat määriteltynä, voidaan aloittaa tuotteen toimintorakenteen määrittäminen. Tuotteella on yleisesti aina jokin tietty tehtävä, joka tulee pystyä täyttämään vaadittujen reunaehtojen mukaisesti. Tehtävä määritellään laatimalla tuotteelle tai sen osakokonaisuudelle toimintokuvaus, esimerkiksi ”kuvata kappaleita” tai ”siirtää vääntömomentti”. Tuotteen kokonaistoiminto jakaantuu osatehtäviin ja osatoimintoihin järjestelmän monimutkaisuuden mukaan. Toimintorakenne esitetään loogisena kaaviona, josta ilmenevät järjestelmän kokonaistoiminnon osatoiminnot. Toimintorakenne on usein hahmotelma, jota voidaan muokata ratkaisua etsiessä, sillä uusissa tuotteissa osatoiminnot ja niiden suhteet ovat usein tuntemattomia. Tuotteelle voidaankin usein määritellä monia erilaisia ja vaihtoehtoisia toimintorakenteita. (Airila ym. 1985, s. 19-20)

Toimintorakenteen hahmottelun jälkeen aloitetaan eri osatoimintojen ratkaisuperiaatteiden etsiminen. Osatoiminnot voidaan usein toteuttaa yksinkertaisesti käyttämällä jo ennestään tuttuja rakenteita ja ratkaisuja, esimerkiksi valmiita kytkimiä, vaihteita ja muita peruskomponentteja. Ratkaisuperiaatteita löydetään paljon myös tarkastelemalla muita olemassa olevia tuotteita ja niiden toimintorakenteita, sekä fysikaalisia vaikutuspe-

riaatteita. Parhaassa tapauksessa tuotteen fysikaaliset toiminnot voidaan ilmaista matemaattisina funktioina, jolloin voidaan löytää uusia ja erittäin hyviä ratkaisuja, ja jopa optimiratkaisun kehittäminen on mahdollista. Tiettyjen toimintojen ratkaisumalleja löydetään usein myös analysoimalla luonnossa esiintyviä rakenteita ja järjestelmiä. Erilaiset ideointimenetelmät ovat erityisen hyödyllisiä, kun tuotetta suunnittelevat useat henkilöt tai halutaan asiantuntemusta useilta henkilöiltä, esimerkiksi aivoriihi on hyvä ja perinteinen tapa ideoida. Kun jokaiselle osatoiminnolle on löydetty useampi erilainen ratkaisu, aloitetaan tuotteen toimintojen periaateyhdistelmien hahmottelu. Lopuksi tuoteluonnoksen eri ratkaisut tulisi vielä arvostella, eli määritellään kunkin ratkaisun arvo tai hyöty verrattuna asetettuihin tavoitteisiin. Tavoitteena on siis valita parhaat ratkaisut ennen varsinaisen kehitystyön aloitusta. (Airila ym. 1985, s. 20-24)

Luonnosteluvaiheen lopuksi valitaan lupaavin vaihtoehto, josta lopullista, markkinoitavaa tuotetta aletaan kehittää. Tuotteen konstruktion laadinta aloitetaan valittujen luonnosten ja alustavien raaka-aineiden pohjalta. Konstruktiota laadittaessa tulisi kiinnittää erityistä huomiota niihin ratkaisuihin, jotka liittyvät tuotteen päätoimintoihin, esimerkiksi käyttävien akseleiden halkaisijat ja moottorien päämitat. Tämän jälkeen suunnitellaan sivutoimintoja, kuten tiivistyksiä, kiinnityksiä ja muita perusrakenteita. (Airila ym. 1985, s. 25-26)

Suunnitteluvaiheessa kannattaa noudattaa perussuunnitteluperiaatteita, joiden avulla parhain ratkaisuperiaate kullekin toiminnolle valitaan. Ensimmäisenä on tehtävän jakaminen, eli selvitetään, voidaanko eri tehtävät toteuttaa yksittäisellä toiminnonkantajalla vai tarvitaanko useampia komponentteja esimerkiksi luotettavuus tai valmistussyistä. Tästä erittäin hyvänä esimerkkinä on kiilahihnaveto, joka voidaan toteuttaa yhdellä paksulla hihnalla tai vaihtoehtoisesti useammalla ohuella hihnalla, jolloin laite toimii, vaikka yksittäinen hihna katkeaa. Osatoiminnot tulisi kuitenkin yleisesti ottaen pyrkiä toteuttamaan mahdollisimman vähällä toiminnonkantajien lukumäärällä, mikä alentaa komponenttien lukumäärää ja tuotteen valmistuskustannuksia, sekä yleensä parantaa luotettavuutta. Toisena suunnitteluperiaatteena on voimien johtaminen. Rakenteissa tulisi välttää jyrkkiä suunnanmuutoksia ja äkillisiä poikkipinta-alan vaihteluita eli rakennelujuus pyritään saamaan tasaiseksi. Voimat ja momentit tulisi johtaa mahdollisimman lyhyitä reittejä, jolloin raaka-ainemäärät ja muodonmuutokset pysyvät pieninä. Voimien johtamisessa on usein hyvä pyrkiä tasapainotettuihin tai symmetrisiin rakenteisiin, mikä mahdollistaa sivusuu-

reiden, kuten massavoimien, vaikutuksen vähentämisen. Kolmas periaate on mukautuvuus ja itsetehostus, eli pyritään valitsemaan sellaiset rakenteet, joilla saavutetaan keskinäinen tukivaikutus ja mahdollisen ylikuormitustilanteen suojaus. Esimerkkinä tällaisesta rakenteesta on painesäiliön miesluukku, joka tiivistyy sitä tiukemmin, mitä kovempi paine säiliössä on. Neljäntenä ja viimeisenä periaateyhdistelmänä tässä listassa ovat varmuuteen, turvallisuuteen ja luotettavuuteen liittyvät tekijät. Varmuus voi olla välitöntä, välillistä tai ohjeellista. Yleensä pyritään välittömään varmuuteen, joka voi olla elinikäistä, rajoitettua tai varmennettua käyttövarmuutta. Välillinen varmuus toteutetaan suoja- tai valvontajärjestelmien avulla. Ohjeellinen varmuus toteutetaan vaaratilanteista tiedottamalla. (Airila ym. 1985, s. 27-29)

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon tuotteen rakenteiden rasitukset, muodonmuutokset ja värähtelyt, mikä onnistuu käyttämällä lujuuslaskentaa. Lujuuslaskennan avulla saavutetaan oikeanlainen mitoitus rakenteille ja päästään riittävään varmuuteen vaurioitumisen estämiseksi. Lisäksi myös materiaalin käyttöä saadaan optimoitua. Lujuuslaskennassa tarkastellaan rakenteeseen kohdistuvia ulkoisia kuormituksia ja niiden aiheuttamia sisäisiä jännityksiä. Kun sisäinen jännitys on laskettu, voidaan sitä verrata rakenteessa käytetyn materiaalin lujuusominaisuuksiin. Rakenteessa tapahtuu kuormituksen aikana muodonmuutoksia, joiden tulee yleensä pysyä elastisina, ja ne voivat olla toivottuja tai ei-toivottuja. Muodonmuutokset eivät saisi aiheuttaa häiriötilanteita laitteen käytön aikana. Laitteen värähtely lisää yleensä kuormituksia erityisesti resonanssivärähtelyjen tapauksessa. Laitteen epätoivottua resonointia tulisikin välttää varsinkin, kun riittävään vaimennukseen ei ole mahdollista päästä. (Airila ym. 1985, s. 29-31)

Laitteen käyttöolosuhteet ja laitteen toiminnasta aiheutuvat muutokset tulee ottaa suunnittelussa huomioon. Lämpölaajeneminen aiheutuu ympäristön lämpötilan muutoksesta tai laitteen omasta lämpenemisestä ja se voi aiheuttaa ongelmia, esimerkiksi ylimää räisiä jännityksiä tai muodonmuutoksia. Lämpölaajenemiseen liittyviä ongelmia on kuitenkin mahdollista eliminoida erilaisilla konstruktioratkaisuilla. Ympäristön vaikutuksista myös korroosio tulisi ottaa suunnittelussa huomioon. Useissa tapauksissa korroosiota ei voida kokonaan välttää, mutta sitä voidaan hidastaa ja vähentää. Usein korroosionkeston lisäys on taloudellinen kysymys, sillä korroosionkestävät raaka-aineet ovat kalliimpia. Mekaaniset laitteet kuluvat käytössä, mikä tulee myös ottaa suunnittelussa huomioon. Kuluminen voidaan jaotella adhesiiviseen, abrasiiviseen ja korrosiiviseen kulumiseen, sekä pinnan väsymiseen. (Airila ym. 1985, s. 31-38)

Suunnittelijan päätökset määrittävät suurilta osin tuotteen valmistuskustannukset, läpimenoajan ja laadun. Suunnittelija päättää muun muassa tuotteen muodoista, mitoista, pinnanlaaduista, toleransseista ja muista yksityiskohdista. Näiden päätösten perusteella määräytyvät eri osien valmistusmenetelmät, käytetyt koneet ja työkalut, käytettävät raaka-aineet, sekä päätökset liittyen valmistuksen alihankintaan ja laaduntarkkailuun. Suunnittelijan tulee pyrkiä valmistusystävälliseen suunnitteluun, jonka päätavoitteena on pienentää tuotekustannuksia ja parantaa laatua. (Airila ym. 1985, s. 38)

Suunnittelussa viimeisenä vaiheena on suunnittelutyön tuloksen arviointi. Tulos arvostellaan samalla tyylillä, kuin luonnosteluvaiheessa käyttäen teknisiä ja taloudellisia kriteerejä. Arvioinnissa voidaan vertailla eri suunnittelupiirustuksia, jotka ovat samassa toteutusvaiheessa, mutta joiden osakokonaisuudet eroavat olennaisesti toisistaan, sekä eri suunnitelmien valmistuskustannuksia. Arvostelukriteerien määrittäminen voi perustua tuotteen vaatimuslistaan, eli tarkastellaan, missä asioissa ratkaisu täyttää tai ylittää vaatimukset ja täyttää toivomukset. (Airila ym. 1985, s. 38)

3.1 3D-tulostus

Pikavalmistus (rapid prototyping, RP) sisältää useita erilaisia uusia valmistusmenetelmiä ja sovelluksia, joista tunnetuin ja yleisin on 3D-tulostus. RP-termiä käytetäänkin usein kuvaamaan nimenomaan 3D-tulostusta. Pikavalmistuksessa mielivaltainen kolmiulotteinen kappale valmistetaan suoraan numeerisesta mallista (tyypillisesti CAD-malli) käyttämällä nopeaa, täysin automaattista ja mukautuvaa valmistusprosessia. Pikavalmistus voidaan määritellä myös seuraavalla tavalla: teknologia, jolla voidaan tuottaa nopeasti fyysisiä osia suoraan 3D-datasta käyttämällä materiaalia lisääviä menetelmiä. Pikavalmistusta käytetään esimerkiksi kappaleiden muodon, yhteensopivuuden ja toiminnallisuuden testaamiseen, ja sillä voidaan tuottaa nopeasti myös esimerkiksi työkaluja ja muotteja. (Noorani 2006, s. 2-3) Pikavalmistusprosessit eroavat perinteisistä valmistusprosesseista huomattavasti ja yleisesti pikavalmistusprosessi voidaan jakaa seuraavan luotelman mukaisiin vaiheisiin.

Pikavalmistuksen vaiheet (Noorani 2006, s. 36):

1. suunnitelman CAD-mallin muodostus
2. mallin muunnos STL-formaattiin (stereolithography file tai standard tessellation language)
3. STL-tiedoston siivutus (slicing)
4. kappaleen kasvatus lisäävällä valmistusmenetelmällä
5. kappaleen viimeistely.

3D-tulostus on kohtalaisen uusi valmistusmenetelmä. Ensimmäiset 3D-tulostimet kehitettiin 1980-luvulla ja 90-luvulta eteenpäin 3D-tulostimiin liittyen on julkaistu useita patentteja. 3D-tulostimille on kehitetty monenlaisia eri toimintaperiaatteita. Ensimmäiset 3D-tulostimet olivat SLA-tulostimia (stereolithography apparatus), joissa valoreaktiivista nestettä kovetaan laserilla. Tekniikkaa kutsutaan myös allasvalopolymerisaatioksi (Bruun & Hokkanen 2016, s. 9). Jauhepeti- eli SLS-tulostimissa (selective laser sintering) kappale muodostetaan jauheesta laserilla sulattamalla tai sintraamalla. Materiaalin pursotustekniikkaan perustuvat FDM-tulostimet (fused deposition modeling), tai yleisimmin FFF-tulostimet (fused filament fabrication), yleistyivät voimakkaasti 2000-luvulla tekniikan pääpatenttien raukeamisen myötä. (Horvath & Cameron 2020, Kappale 1) Kaikkien erityyppisten 3D-tulostimien perustoimintaperiaate on kuitenkin samanlainen; kappale muodostetaan jonkinlaiselle alustalle lisäämällä ainetta kerroksittain (Horvath & Cameron 2020, Kappale 2). Tässä kappaleessa keskitytään FFF- ja SLA-tulostimiin.

FFF-tulostin on ylivoimaisesti yleisin kuluttajakäytössä oleva 3D-tulostintyyppi. FFF-tulostimessa muovilankaa eli filamenttia vedetään kelalta suuttimeen, jossa se sulatetaan ja pursotetaan ohuina viivoina alustalle. FFF-tulostimet voidaan luokitella ohjauskoordinaattiston mukaan karteesisiin ja ei-karteesisiin pääluokkiin. Karteesisessa 3D-tulostimessa jokaisella pääakselilla (x, y, z) on oma ohjaava moottori. Ei-karteesisessa 3D-tulostimessa moottorit eivät ohjaa suoraan tiettyä akselia. Yleisin ei-karteesinen 3D-tulostintyyppi on ns. deltabot, joka perustuu teollisuudessa käytettyihin nopeisiin poimintaroboteihin. (Horvath & Cameron 2020, Kappale 2)

FFF-tulostimella on mahdollista tulostaa monenlaisia materiaaleja, joista yleisimmät ovat PLA, PET, ABS ja Nylon. Filamenteissa yleisimmät paksuudet ovat 1,75 mm ja 2,85 mm. Eri tulostusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet ja tulostusparametrit eroavat toisistaan ja niillä voi olla myös omia tulostukseen liittyviä erityispiirteitä ja -vaatimuksia. PLA on

kuluttajakäytössä yleisin filamenttimateriaali. Sillä on kohtalaisen alhainen sulamispiste ja se tarttuu hyvin tulostusalustaan. PLA ei tarvitse välttämättä lämmitettyä tulostusalustaa, mikä on myös yksi syy sen suosioon. PLA:n alhainen sulamispiste on kuitenkin myös ongelma, jonka takia sitä ei voi käyttää sovelluksissa, joissa osat altistuvat korkeille lämpötiloille. PET, ABS ja Nylon ovat PLA:ta mekaanisesti kestävämpiä materiaaleja ja ne kestävät myös korkeampia lämpötiloja. Edellä mainitut materiaalit ovat kuitenkin haasteellisempia tulostettavia, sillä ne vaativat esimerkiksi lämmitetyn tulostusalustan. Lisäksi tulostetut kappaleet voivat lähteä taipumaan lämpövaikutuksien takia, mikä aiheuttaa ongelmia. Joissain FFF-tulostimissa voidaan käyttää myös useampaa tulostuspäätä kerrallaan, jolloin erilaisten materiaalien tulostus on mahdollista samanaikaisesti. Yleinen tapa on käyttää lisätulostuspäätä liukenevan tukimateriaalin tulostukseen, jolloin kappaleiden jälkikäsittely ja viimeistely on helpompaa. (Horvath & Cameron 2020, Kappale 2)

Allasvalopolymerisaatioon perustuvia 3D-tulostimia kutsutaan usein resiini-3D-tulostimiksi tai lyhyemmin SLA-tulostimiksi. SLA on kuitenkin terminä hieman tulkinnanvarainen, sillä sen alle kuuluvat myös DLP- (Digital Light Processing) ja LCD-DLP-tulostimet (LCD-näyttöteknologiaan perustuva DLP-tulostin). Erilaiset SLA-tulostimet ovat kuitenkin perustoiminnaltaan samankaltaisia; nestemäinen tulostusaine, eli resiini, on sijoitettu laitteen altaaseen, jossa se kovetetaan valon avulla ohuina kerroksina korkeussäädettävälle tulostusalustalle. (Horvath & Cameron 2020, Kappale 2)

SLA-tulostimilla voidaan valmistaa huomattavasti tarkempia osia, kuin FFF-tulostimilla. Tulostusmateriaaleina käytetään erilaisia valokovetteisia hartseja/resiinejä, joista useimmat kovettuvat vain UV-valolla. Käytettävissä on myös erikoisempia tulostusmateriaaleja, kuten taipuisat ja joustavat materiaalit, bioyhteensopivat materiaalit ja metallien valamiseen soveltuvat, korkeita lämpötiloja sietävät materiaalit. SLA-tulostimella tulostetut kappaleet vaativat omanlaisensa viimeistelyn. Tulostuksen jälkeen kappaleet puhdistetaan yleensä isopropanolilla ylimääräisestä, kovettumattomasta resiinistä. Tämän jälkeen kappaleille tehdään jälkikovuus UV-valolla. Lopuksi kappaleet viimeisellään esimerkiksi poistamalla tukirakenteet. (Horvath & Cameron 2020, Kappale 2)

4 MATERIAALINKÄSITTELY

Laitteistoa suunniteltaessa on hyvä perehtyä materiaalinkäsittelyn peruseräperiaatteisiin, sillä niiden ymmärtäminen helpottaa komponenttien valintaa, sekä järjestelmän toiminnan ja rakenteen suunnittelua. Materiaalinkäsittely on tieteen haara, joka sisältää periaatteet kaikenlaisien materiaalien liikkutteluun, pakkaamiseen ja säilytykseen. Materiaalien jalostus ja muu prosessointi eivät kuitenkaan kuulu materiaalinkäsittelyyn, mutta materiaalinkäsittely on kuitenkin yleensä tärkeässä osassa erilaisissa prosesseissa. Materiaalinkäsittelyyn kuuluvia osa-alueita ovat esimerkiksi kuljettimet, syöttölaitteet, kappaleittävän käsittely, paketointi, varastointi ja kuljetus, sekä logistiikka. (Fayed & Skocir 1997, s. 3)

4.1 Kuljettimet

Kuljettimet voidaan jakaa rakenteensa mukaan eri päätyyppeihin, joita ovat esimerkiksi hihnakuljettimet, ruuvikuljettimet, tärykuljettimet, kolakuljettimet ja lokeroelevaattorit (Fayed & Skocir 1997, s. 2; Koivisto 2017). Kuljettimista on olemassa paljon tietoa ja niiden suunnittelu on työlästä, minkä takia kunnollinen lopputulos vaatii suunnittelijalta yleensä kohtalaisen määrän kokemusta. Kuljettimiin liittyviä kaavoja ja taulukoita on olemassa suuret määrät eri tapauksille, ja eri lähteiden välillä voi olla jonkin verran eroavaisuuksia. Tämän takia tässä kappaleessa keskitytään vain muutamaankin kuljetintyyppiin ja niiden perusrakenteeseen ja -toimintaan, sekä hyviin ja huonoihin puoliin.

Kuljettimen valinta prosessiin on materiaalinkäsittelyyn liittyvä suunnitteluongelma. Suuremmissa kuljetinjärjestelmissä eri komponentit vaikuttavat toisiinsa, joten järjestelmää on tarkasteltava aina kokonaisuutena. Kuljettimen valinta kannattaakin ajatella tekniikan ongelmana, eli ratkaisun tulisi vastata tässä tapauksessa kysymyksiin, miten, minne, milloin ja miksi materiaalia kuljetetaan. Yleensä kuljetinjärjestelmän suunnittelussa korostuvat suunnittelijan käytännön kokemus, sekä suunnittelevan yrityksen tietotaito vuosien varrelta. Eri teollisuuden aloilla käytetään tavallisesti juuri tietyn tyyppisiä kuljettimia, joiden valinta perustuu nimenomaan aikaisempiin käyttökokemuksiin. (Fayed & Skocir 1997, s. 4) Kuljettimien mitoituksessa käytetään usein kaavoja, jotka myös perustuvat käyttökokemuksiin ja niistä saatuihin kertoimiin, sillä täysin teoreettinen

tarkastelu on yleensä vaihtelevien olosuhteiden ja muiden epävarmuuksien takia hankalaa. Suunnittelijan tulee huomioida, että kuljettimen valinnassa ja mitoituksessa voidaan päästä toimivaan lopputulokseen useilla erilaisilla ratkaisulla. (Koivisto 2017, s. 7-8)

4.1.1 Hihnakuljetin

Hihnakuljetin on nykyisin yleisin teollisuudessa käytetty mekaaninen kuljetintyyppi ja sitä käytetään yleensä bulkkimateriaalien ja kappaletavaran siirtoon. Hihnakuljetin soveltuu parhaiten keskisuurten tai suurten materiaalmäärien siirtämiseen pitkillä siirtomatkoilla. Hihnakuljettimen nousukulma voi olla materiaalista riippuen 15–20 astetta ja kuviollisia hihnoja käytettäessä jopa 30 astetta. (Koivisto 2017, s. 156) Erityisratkaisulla nousukulma voi kuitenkin olla vieläkin korkeampi (Fayed & Skocir 1997, s. 37). Hihnakuljetin on taloudellinen kuljetinratkaisu, sillä sen kapasiteetin ja tehontarpeen suhde on erittäin hyvä, minkä lisäksi kuljetin kostuu suurimmaksi osaksi valmiina löytyvistä komponenteista. Hihnakuljetin on myös yleensä kohtalaisen hiljainen. Hihnakuljettimen suurin puute on sen avonainen rakenne. Perinteinen hihnakuljetin on vaikea saada täysin tiiviiksi ja usein kuljetin on syytä varustaa erilaisilla suojakate- ja muovi- tai kumireunusratkaisulla. Lisärakenteet kuitenkin yleensä koskettavat hihnan pintaa ja lisäävät näin ollen myös kuljettimen tehontarvetta. (Koivisto 2017, s. 156)

Hihnakuljettimen rakenne voidaan jaotella yleisesti eri pääosiin ja komponentteihin. Hihnakuljettimet ovat usein kymmeniä tai satoja metrejä pitkiä, jolloin runko toteutetaan ristikkorakenteilla ja pitkillä jänneväleillä. Lattiatasolla olevien kuljettimien runkona toimii palkkirakenne, joka on tuettu pystytolpilla lattiaan. Kuljettimeen on päästävä käsiksi huoltotilanteessa, joten rungon vierellä tulee olla mielellään molemminpuolinen kulku-reitti. (Koivisto 2017, s. 158)

Kuljettimen käyttökoneistona on usein vaihdemoottori. Moottoria valittaessa tulee huomioida käyttöolosuhteet, esimerkiksi pölyävää materiaalia käsiteltäessä tulee huomioida moottorin suojausluokka eli IP-luokitus. Kuljettimen hihna asennetaan veto- ja taittorumpujen välille. Rumpuja on olemassa varustettuna erilaisilla pinnoitteilla, jotka myös valitaan käyttöolosuhteiden mukaan. Rumpujen vaipassa on niin sanottu bombeeraus eli tynnyrimäisyys, jolla mahdollistetaan hihnan keskitys. Veturumpu välittää moottorin momentin hihnalle, jolloin hihnan ja rummun välisen kitkavoiman täytyy olla suurempi, kuin hihnan kuormituksen aiheuttama vastusvoima. Hihnan käyttötarkoituksen mukaan kuljet-

timessa voidaan käyttää erilaisia rullia ja telineitä. Rullat ja rullastot ovat laajasti standardisoituja ja niitä löytyy kattavasti eri käyttötarkoituksiin. Rullilla saadaan aikaan hihnan muoto siirtokohdassa. Esimerkiksi jauheita käsiteltäessä käytetään koururullastoja, joilla hihnan muodosta saadaan kourumainen. (Koivisto 2017, s. 158-160)

Kuljetinhihna valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Hihna koostuu vahvikkeista, välikumista ja pintakerroksista. Vahvikkeet antavat hihnalle vetolujuutta ja joustavuutta. Välikumi pitää hihnaa kasassa ja vaimentaa iskuja, sekä jakaa jännityksen vahvikekerroksille. Hihnan pintakerroksen eli peitteen paksuus valitaan kuljetettavan aineen kuluttavuuden mukaan. Paksulla peitteellä varustettu hihna kestää hyvin kulutusta, mutta se vaatii suuremmat päätyrummut huonomman joustavuuden takia. (Koivisto 2017, s. 160)

Kuljettimen hihna ja rummut tarvitsevat yleensä puhdistimet, joita ovat esimerkiksi kaaarit ja harjat. Hihan kiristys toteutetaan erityisellä kirityslaitteella, jossa yleisin ratkaisu on ruuvikiristin. Pitkillä kuljettimilla käytetään kiristyskelkkaa tai vaunukiristystä. Hihnakuljetin on avonaisen rakenteensa takia hyvin tapaturma-altis, joten kuljettimelle on asennettava erilaisia turvalaitteita. Yleisimmät hihnakuljettimessa käytetyt turvalaitteet ovat turvakytkimet, köysihätäpysäytin, pyörintävahti, hihnan sivusiirron vartija ja ruuhkavahti. (Koivisto 2017, s. 160-163)

4.1.2 Ruuvikuljetin

Ruuvikuljetin on monipuolinen kuljetintyyppi, jota voidaan käyttää aineiden siirtoon, syöttöön, sekoitukseen ja hallittuun purkamiseen. Ruuvikuljetinta käytetäänkin monipuolisesti eri teollisuuden aloilla, esimerkiksi elintarviketeollisuudessa ja voimalaitoksissa. Ruuvikuljettimessa materiaalin siirto ja käsittely toteutetaan ruuvikierukan avulla, joita on olemassa monentyyppisiä eri materiaaleille ja toiminnoille. Ruuvikuljettimen tärkein etu on sen yksinkertainen ja suljettu rakenne. Suljettu rakenne on turvallinen ja mahdollistaa pölyävien sekä kosteiden materiaalien käsittelyn ilman monimutkaisia erityisratkaisuja. (Koivisto 2017, s. 64-65) Ruuvikuljetin on erittäin pieniprofiilinen verrattuna muihin kuljetintyyppeihin, eikä siinä ole varsinaista paluupuolta, kuten esimerkiksi hihnakuljettimessa. Oikein suunnitellun ruuvikuljettimen kustannukset, huollon tarve ja energiankulutus pysyvät kohtuullisina. Ruuvikuljettimen puutteina ovat syötön epätasaisuus ja huono itsestään puhdistuvuus ja tyhjeneminen. (Fayed & Skocir 1997, s. 168-169)

Ruuvikuljettimen rakenne voi vaihdella huomattavasti eri käyttötarkoitusten mukaan, mutta perusrakenne voidaan kuitenkin jaotella eri pääosiin ja -komponentteihin. Teollisuuden ruuvikuljettimissa käytetään yleisesti joko koururunkoa tai putkirunkoa. Koururunko on poikkileikkaukseltaan U-mallinen, ja sen päällä on kannet, jotka ovat yleensä kiinnitetty pulttiliitoksilla. Kannet helpottavat kuljettimen huoltotöitä, sekä puhdistusta ja tyhjennystä. Koururungon kannet voidaan myös tiivistää, jolloin kuljettimesta saadaan pölytiivis. Putkirunko on edullisempi vaihtoehto koururungolle, ja sitä käytetään erityisesti kevyiden ja helposti liikuteltavien aineiden siirrossa. Se valitaan, kun kuljettimesta halutaan erityisen tiivis ja kun kuljettimelle ei juurikaan tarvitse suorittaa huoltotoimenpiteitä. (Koivisto 2017, s. 67)

Ruuvikuljettimessa materiaalinkäsittely tapahtuu ruuvin avulla. Kuljettimen ruuvikoonpano koostuu yleensä keskusputkesta ja siihen liitetystä kierreestä, sekä päiden akseleista, holkeista ja muista kiinnitysosista (Fayed & Skocir 1997, s. 174). Erilaisia kuljetinruuvityyppejä on olemassa hyvin suuret määrät eri kohteisiin ja käyttötarkoituksiin. Ruuvin kierteen malli ja nousu suunnitellaan käyttökohteen mukaan. Jos kuljettimen tulokapasiteetti on hallitsematon, esimerkiksi siilosta suoraan syöttävän kuljettimen tapauksessa, käytetään tuloaukon kohdalla tiheämpää kierrettä. Tällöin ruuvin varsinaisella siirto-osalla täyttöaste pysyy pienempänä, mikä ehkäisee tukkeutumista. Ruuvissa voi olla myös niin sanottuja meloja, joita käytetään erityisesti sekoituskäytössä. Samassa kuljettimessa voi olla myös useampi ruuvi rinnakkain. (Koivisto 2017, s. 69)

Ruuvikokoonpano kiinnittyy runkoon laakeriyksiköiden avulla. Laakeroinnin suunnittelussa on huomioitava, että kuljettimen ruuvi aiheuttaa käyttöpään laakerille aksiaalivoi-man. Ruuvikuljetin voi toimia vetävällä tai työntävällä periaatteella, mikä pitää huomioida laakereiden ja erityisesti kiristysholkkien asennuksessa. Pitkät kuljettimet kannattaa suunnitella vetävällä periaatteella, jolloin ruuvin keskusputkeen ei kohdistu puristusvoimaa ja siitä johtuvaa nurjahdusriskiä. Lämpölaajenemisen takia vapaan päädyn laakeria ei saa lukita, jolloin siihen ei kohdistu myöskään laajenemisen aiheuttamaa aksiaalivoimaa. (Koivisto 2017, s. 69-70)

Ruuvikuljettimen tulo- ja poistoaukot eli suppilot sijoitetaan ruuvin vetotavan mukaan. Vetävällä kuljettimella poistosuppilo on siis käyttöpään puolella. Suppiloiden suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota erityisesti poistoaukon kokoon, joka tulee suunnitella riit-

tävän suureksi ruuhkautumisen välttämiseksi. (Koivisto 2017, s. 72) Tulo- ja poistoaukkoja voi olla myös useita samassa kuljettimessa, esimerkiksi useampaa tuloaukkoa voidaan käyttää sekoituskäytössä. Kun suppiloissa on erilliset sulkupellit, voidaan yhdellä kuljettimella siirtää eri materiaaleja eri paikkoihin. (Fayed & Skocir 1997, s. 168-169)

4.1.3 Tärykuljetin

Tärykuljettimet ja -syöttimet ovat tehokkaita ja luotettavia laitteita materiaalien siirtoon. Niitä käytetään yleensä lyhyillä ja keskipitkillä matkoilla ja niillä voidaan käsitellä monenlaisia eri materiaaleja. Tärykuljetin voidaan suunnitella käytännössä mille tahansa rakaiselle materiaalille ja myös paakkuuntuvia aineita voidaan käsitellä tällä kuljetintyyppillä. Teollisuudessa tärykuljettimia käytetään monipuolisesti esimerkiksi lääketeollisuudessa ja kaivoksissa. (Fayed & Skocir 1997, s. 225-226)

Tärykuljettimen mekaaninen perusrakenne voidaan jakaa materiaalin kuljetuskaukaloon, runkorakenteisiin ja käyttökoneistoon (Fayed & Skocir 1997, s. 226). Kaukalo on kuljettimessa suoraan kosketuksissa käsiteltävän materiaalin kanssa, joten kuljettimissa käytetään tehtävästä riippuen eri muotoisia ja tyyllisiä kaukaloita. Pölyäviä aineita kuljettaessa kaukalo peitetään usein kannella tai vaihtoehtoisesti se voidaan valmistaa putkesta. Tärykuljetinta voidaan käyttää myös materiaalin seulontaan asentamalla esimerkiksi metalliverkkoa kaukalon yhteyteen. (Fayed & Skocir 1997, s. 247-248)

Tärykuljettimen runkona toimii usein palkkirakenne, joka voi koostua sovelluksesta riippuen useista eri osista. Rungon komponenteiksi voidaan lukea myös erilaiset tukivarret, jouset ja vaimentimet. Tärykuljettimen perusratkaisussa kaukalo on asennettu tukivarsien ja jousien välityksellä palkkirunkoon. Palkkirunko on yleensä erotettu perustasta erillisten vaimentimien tai jousien avulla. Tärykuljettimen rakenteelle on monia erilaisia vaihtoehtoja tasapainotuksen suhteen. (Fayed & Skocir 1997, s. 248-252)

Tärykuljettimen käyttökoneisto voi perustua sähkömekaaniseen, sähkömagneettiseen tai paineilmatomiseen toimilaitteeseen. Sähkömekaaninen käyttö koostuu sähkömoottorista, joka pyörittää kampiakselia tai epäkeskopainoa. Epäkeskopainoja voi olla myös pari, jotka pyörivät vastakkaisessa vaiheessa. Sähkömagneettinen käyttölaite tuottaa suoraan kuljettimen vaatiman lineaariliikkeen. Siinä sähkömagneetille tuodaan vaihtovirtaa, joka liikuttaa magneettisydäntä edestakaisin syötetyn vaihtovirran taajuuden mukaan.

Toimintaperiaatetta voidaan verrata kaiuttimeen. Paineilmatoimisessa käyttölaiteessa lineaariliike toteutetaan usein paineilmasylinterin avulla. Tähän käyttötarkoitukseen suunnitelluissa sylintereissä venttiilikoneisto on yleensä integroitu sylinterirunkoon, joten erilisiä venttiileitä ei tarvita. (Fayed & Skocir 1997, s. 232-246)

4.2 Säiliöt

Kuljettimien ja yleensäkin materiaalinkäsittelyn yhteydessä on hyödyllistä tutustua myös säiliöihin ja siiloihin liittyviin asioihin. Säiliön suunnittelussa sen perustoiminnallisuuden tulee kiinnittää erityistä huomiota. Säiliön tulee olla oikean kokoinen ja siinä pitää olla toimivat ratkaisut täyttämiseksi ja tyhjentämiseksi, minkä lisäksi sen pitää olla rakenteellisesti tarpeeksi tukeva. Säiliön purkuaukko tulee suunnitella oikeanlaiseksi käsiteltävän materiaalin ja määrän mukaan, sillä vääränlaisen rakenteen takia materiaalivirtaan voi tulla monenlaisia ongelmia, kuten tukkeutumista ja kanavoitumista. (Boumans 1985, s. 26-27) Säiliöihin lisätään usein myös pinnanmittaus, jolla säiliön täyttöasteesta saadaan tieto muulle automaatiolle (Boumans 1985, s. 371). Pinnanmittauksessa voidaan käyttää monenlaisia eri ratkaisuja, esimerkiksi kiintoaineen tapauksessa käytetään usein sopivia kytkimiä sekä antureita, joita ovat esimerkiksi kapasitiiviset anturit ja ultraääneen tai mikroaaltoihin perustuvat laitteistot (Nivelco 2018).

5 AUTOMAATIO

Nykyaikaisissa automaattisissa koneissa käytetään pääasiassa elektronisia ohjausratkaisuja. Ohjausjärjestelmään sisältyy käyttöliittymä tai rajapinta käyttäjän ja koneen välille, eli koneessa voi olla esimerkiksi näyttö ja erilaisia painikkeita, jotka ovat liitetty ohjausjärjestelmään. Ohjausjärjestelmä kerää tietoa koneen tilasta antureiden avulla ja välittää tiedon käyttäjälle esimerkiksi näytön tai merkkivalojen välityksellä. Ohjausjärjestelmä voi olla hyvin yksinkertainen, esimerkiksi yksinkertaiseen koneeseen voi riittää pelkkä ohjelmoitava rele, mutta varsinkin teollisuudessa ohjausjärjestelmät ovat kuitenkin laajoja ja hierarkkisia järjestelmiä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 248)

5.1 Teollisuuden ohjausjärjestelmät

Teollisuuden automaatiossa käytetään nykyisin yleisimmin erilaisia ohjelmoitavia logiikoita (PLC, Programmable Logic Controller) ja teollisuus-PC:tä (IPC, Industrial PC). Teollisuusautomaation ohjauslaitteet vastaanottavat järjestelmän antureilta saadut signaalit ja suorittavat ohjausohjelman määäämät ohjaustoimenpiteet. Ohjausjärjestelmä voi suorittaa myös monipuolisesti muita tehtäviä, kuten laskentaa, säätöä, valvontaa, hälytysten käsittelyä, raportointia ja tietoliikennetoimintoja. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 248)

Teollisuuden logiikat jakautuvat nykyisin rakenteensa perusteella kahteen pääryhmään: kompaktilogiikoihin ja modulaarisiin logiikoihin. Kompaktilogiikoita käytetään pienissä järjestelmissä, joissa ei tarvita suurta määrää tuloja ja lähtöjä. Kompaktilogiikat voivat olla rajallisesti laajennettavissa. Modulaarinen logiikkajärjestelmä kasataan halutuista yksiköistä ja se on yleensä helposti laajennettavissa. Modulaariseen logiikkaan kuuluu keskusyksikkö ja haluttu määrä I/O-liitäntäyksiköitä ja muita tarvittavia moduuleita, esimerkiksi tietoliikenneyksiköitä ja moottorinohjaimia. PLC sisältää oman keskusyksikkönsä, joka on rakenteellisesti hyvin pitkälti tavallista tietokonetta vastaava. Logiikoiden ohjaus ja seuranta, sekä ohjelmointi voi tapahtua järjestelmään liitetyn IPC:n kautta. IPC:t eivät eroa toiminnaltaan juurikaan normaaleista tietokoneista, suurin ero on ympäristöolosuhteiden, kuten värinän kestossa. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 249-255)

5.2 Sulautetut järjestelmät ja mikro-ohjaimet

Sulautetulla järjestelmällä tarkoitetaan tiettyyn tarkoitukseen tehtyä laitetta, jota ohjaa ns. sulautettu tietokone, ja joka sisältää erityisesti elektroniikka ja laitteesta riippuen myös mekaniikkaa. Sulautettuja järjestelmiä käytetään nykyään hyvin monipuolisesti ja niitä löytyykin esimerkiksi autoista, kännyköistä ja kodinkoneista. Teollisuudessa yleistyneissä älykkäissä antureissa käytetään sulautettuja järjestelmiä. Sulautettu järjestelmä sisältää mikro-ohjaimen (MCU, microcontroller unit), tarvittavat tietoliikennekomponentit, sekä tulo- ja lähtökomponentit. Lisäksi järjestelmässä on usein käyttöliittymän vaatimia osia, kuten LCD-näyttö ja painikkeita. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 274)

Mikro-ohjain sisältää prosessorin, muistin ja massamuistia, eli se on rakenteeltaan normaalin tietokoneen kaltainen. Mikro-ohjaimen suorituskky on kuitenkin vain murto-osia verrattuna normaaliin nykyaikaiseen tietokoneeseen, mikä kuitenkin riittää yleensä helposti tehtäviin, joissa ohjainta käytetään. Sulautetussa järjestelmässä ei ole erillistä käyttöjärjestelmää, vaan laitteisto toimii siihen ohjelmoidun ohjaussovelluksen mukaan. Mikro-ohjaimista on saatavilla monipuolisesti erilaisia kehitysalustoja, joilla ohjaimien ohjelmointia voi harjoitella ja jotka soveltuvat hyvin erilaisen prototyyppien toteuttamiseen. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 274)

5.3 Logiikoiden ohjelmointi

Ohjelmoitavat logiikat tarvitsevat toimiakseen vähintään pääohjelman, joka kutsuu funktioita ja toimilohkoja, sekä muita ohjelmia. Ohjelmoitavien logiikoiden ohjelmointi on standardisoitu IEC 61131-3-standardissa ja sen mukaisia logiikoiden ohjelmointitapoja on useita. Perinteisin tapa on käyttää tikapuukaaviota LD (Ladder Diagram), jota kutsutaan myös relekaavioksi. LD muistuttaakin releohjauksissa käytettyjä piirikaavioita. Logiikkakaavio, FBD (Function Block Diagram), on paljon käytetty visuaalinen ohjelmointityyli. Instruktiolista, IL (Instruction List), on yksinkertainen ohjelmointikieli, jolla voidaan toteuttaa yksinkertaisia ohjauksia. Strukturoitu teksti, ST (Structured Text), on BASIC- tai PASCAL-kieliä muistuttava täysi ohjelmointikieli. ST:llä voidaan toteuttaa monimutkaisia laskentaa ja silmukkaoperaatioita sisältäviä ohjelmia. ST on yleisesti käytössä, joten sillä tehdyt ohjelmat voidaan kopioida helposti eri logiikoiden välillä. Viimeinen standardin mukainen ohjelmointityyli on sekvenssikaavio, SFC (Sequential Func-

tion Chart). SFC-ohjelmoinnilla muodostetaan sekvenssin runko ja aliohjelmat toteutetaan muulla ohjelmointitavalla tai yksinkertaisilla ehdoilla. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 259-260)

5.4 Konenäkö

Konenäköä pidetään yleisesti eräänä tekoälytutkimuksen osa-alueena, mutta se on myös tärkeässä osassa nykyaikaista automaatiota ja sitä käytetäänkin yleisesti esimerkiksi robotiikassa (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 310). Konenäkö tutkimuksessa tarkastellaan erilaisia laskennallisia, algoritmisia ja teknisiä ongelmia liittyen kuvien muodostukseen, käsittelyyn sekä automaattiseen tulkintaan. Konenäkö tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena on toteuttaa järjestelmiä, joissa kone ymmärtää kamerasta tai muusta sensorista saatua tietoa ja hyödyntää sitä käytetyssä sovelluksessa. Eri sovelluksissa on kuitenkin erilaisia erityisvaatimuksia ja vaikuttavia tekijöitä, minkä vuoksi yleispäteviä menetelmiä varsinkaan kuvien tulkinnalle ei ole onnistuttu kehittämään. (Pietikäinen & Silvén 2019, s. 127-128)

Konenäkölle on englannin kielessä kaksi merkitykseltään hieman erilaista termiä; ”computer vision” ja ”machine vision”. Computer vision keskittyy konenäkö matemaattiseen teoriaan ja algoritmeihin, sekä usein myös yhteyksiin ihmisen näköaistiin. Machine vision on taas käytännönläheisempi, järjestelmä tekninen lähestymistapa, jossa tarkastellaan esimerkiksi sovellusten vaatimuksia ja rajoituksia, konenäkö kuvanmuodostusta, järjestelmä arkkitehtuuria, laitteistoja ja ohjelmia. (Pietikäinen & Silvén 2019, s. 127-128)

Koneoppimissovelluksissa dataa käytetään esimerkiksi mallien ja luokittelijoiden opetukseen. Datan käsittely tulee toteuttaa huolellisesti, sillä aineistoon liittyvät virheet voivat vääristää sovelluksista saatuja tuloksia, esimerkiksi luokittelijan tarkkuus voi olla näennäisesti hyvä, vaikka todellisuudessa käytännön tarkkuus on huomattavasti huonompi. Data-aineiston näytteet jaetaan ohjatussa oppimisessa tyypillisesti opetus-, validointi- ja testinäytteisiin. Opetusnäytteitä käytetään luokittelijoiden varsinaiseen opetukseen ja validointinäytteillä mitataan opetetun ratkaisun ennustusvirhettä. Testinäytteet ovat kokonaan erillistä dataa, jota käytetään lopuksi ratkaisun testaukseen. (Pietikäinen & Silvén 2019, s. 70)

5.4.1 Konenäköjärjestelmän yleisiä suunnitteluperiaatteita

Teollisuudessa konenäköjärjestelmän toteutusprojekti voidaan jakaa esimerkiksi seuraavansiin vaiheisiin; tehtävän määrittely, laitteiston suunnittelu, kustannusten laskenta sekä järjestelmän kehitystyö ja asennus. Konenäköjärjestelmän suunnittelussa tehtävän määrittely tai laajemmin laitteiston tekninen spesifikaatio on erityisen tärkeä. Kunnollisen spesifikaation määrittely on vaativa tehtävä, sillä konenäkölaitteistoissa on paljon erilaisia komponentteja ja eri sovelluksilla on omat erityispiirteensä. Lisäksi usein ajatellaan, että kuvien käsittely tapahtuu pääasiassa ohjelmistopuolella, mikä ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Vääränlaisten komponenttien valinta aiheuttaa ongelmia, joita voidaan yrittää korjata ohjelmistoilla, mutta tämä hidastaa työn kulkua ja optimaaliseen lopputulokseen ja suorituskykyyn ei yleensä päästä. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Konenäköjärjestelmän suunnittelussa käytetään usein vertailuosia, joita ovat varmasti ominaisuuksiltaan riittävän hyvät osat, sekä välttävät ja riittämättömät osia. Vertailuosia käytetään esimerkiksi valaistuksen ja resoluution määrittämiseen, minkä lisäksi niiden avulla saadaan tuntumaa, miten eri komponentit vaikuttavat järjestelmän eri ominaisuuksiin. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Konenäköjärjestelmän spesifikaatiossa määritellään laitteiston tehtävät, halutut ominaisuudet, käyttöolosuhteet ja muut suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Laitteiston tehtävä ja tehtävästä saatu hyöty ovat määrittelyn tärkeimmät asiat, joten kaikki laitteiston suorittamat tehtävät ja niiden seuraukset tulisi määritellä. Teollisuudessa konenäköjärjestelmä lisätään usein olemassa olevaan järjestelmään lisäosaksi, millä pyritään yleensä saavuttamaan hyötyjä edeltävään järjestelmään verrattuna. Esimerkiksi tuotantolinjan tarkastus voi perustua aluksi satunnaisiin pistokokeisiin ja se päivitetään automaattiseen, konenäköön perustuvaan laitteistoon. Saavutettavilla hyödyillä voidaan arvioida myös konenäköjärjestelmän toteutuksen budjettia. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Spesifikaatiossa kuvaillaan järjestelmässä käsiteltävät kappaleet ja laitteistoa suunniteltaessa niistä tulee selvittää useita ominaisuuksia. Aluksi tulee tietää, ovatko kappaleet yksittäisiä vai jatkuvia, esimerkkeinä jatkuvista kappaleista ovat paperi ja köysi. Kappaleiden koko ja erityisesti äärimatkat selvitetään mahdollisimman tarkasti. Kappaleiden pinnan ominaisuudet ja väri, sekä niihin vaikuttavat ympäristötekijät, kuten pölyisyys ja käsittelystä johtuvat poikkeavuudet tulee selvittää. Myös kappaleiden käsittelyyn vaikutta-

vat tekijät, kuten öljyisyys ja kuluttavuus tulee ottaa huomioon. Kappale-erissä voi esiintyä poikkeavia ja täysin erilaisia kappaleita, jotka voivat vaikuttaa käsittelyyn. Lopuksi määritellään, mitä piirteitä kappaleista tarkastellaan. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Kuvaustilanteessa kappaleiden esitystapaan vaikuttavat erityisesti kappaleiden liike, paikoitustarkkuus sekä näkyvillä olevien kappaleiden määrä. Kappaleiden liikkeelle on kaksi vaihtoehtoa, jatkuva liike ja indeksoitu asemointi. Jatkuvässä liikkeessä olevien kappaleiden kuvaukseen vaikuttavat erityisesti kappaleiden nopeus ja kiihtyvyys. Asemoinnissa taas tulee määrittää tarkka ajankohta kappaleiden pysähtymiselle. Kappaleiden paikoitustarkkuudesta tulee tietää rajat kappaleiden siirtymille ja kääntymisille, mikä määrittää osaltaan kamerassa tarvittavan näkökentän. Jos kuvausalueella on useampia kappaleita kerrallaan, tulee tarkastella, koskettavatko tai peittävätkö kappaleet toisiaan. Päälekkäiset tai toisiaan koskettavat kappaleet peittävät alla olevan kappaleen piirteitä, mikä aiheuttaa usein ongelmia tunnistusalgoritmeille. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Laitteiston suorituskykyvaatimukset voidaan jakaa tarkkuuteen ja nopeuteen tai aikaan liittyviin tekijöihin. Tarkkuusvaatimukset vaikuttavat voimakkaasti kamerassa tarvittavaan resoluutioon. Konenäkölaitteistoa käytetään teollisuudessa usein osana tuotantoprosessia, jolloin laitteiston suorittama tehtävä on kyettävä hoitamaan tietyssä ajassa. Kuvien käsittelyaikaan liittyvät vaatimukset vaikuttavat käytettäviin laitteistoratkaisuihin ja algoritmeihin. Aikamäärittelyssä tulee selvittää jaksonaika, datankeruun aloituskohta, datan käsittelyaika ja jaksojen määrä tarkastuksesta tuloksiin puskurointia varten. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Konenäkölaitteisto tarvitsee yleensä toimiakseen erilaisia tiedonsiirtorajapintoja, joita ovat käyttäjän ja koneen välinen käyttöliittymä, sekä eri järjestelmien väliset rajapinnat. Lisäksi tietoa tallennetaan usein myös esimerkiksi lokitiedostoihin tai tietokantoihin. Yleensä konenäköjärjestelmissä käytetään esimerkiksi seuraavia käyttäjäliittymiä ja käskyjä (Hornberg 2017, Kappale 2):

- käyttöliittymä tulosten tarkasteluun ja käsittelyyn
- käsiteltävän kappaletyypin määrittäminen
- tarkastelun aloitus
- tulosten tallennus.

Laitteiston asennuksessa tulee huomioida asennustilaan ja -ympäristöön liittyvät tekijät. Asennustilassa tulee olla mahdollisuus kameran ja valaistuksen kohdistamiselle. Lisäksi kameran ja keskusyksikön välinen etäisyys tulee tietää johtojen pituuksia määriteltäessä. Seuraavat ympäristötekijät ja ominaisuudet tulee arvioida (Hornberg 2017, Kappale 2):

- ympäristön valaistus
- pöly ja lika
- iskut ja värinä
- lämpötila
- suojaluokkien tarve
- sähkön saatavuus.

Ottamalla huomioon edellä käytyjä asioita, voidaan laitteistolle laatia tekninen spesifikaatio, jonka pohjalta varsinainen suunnittelutyö voidaan aloittaa (Hornberg 2017 kappale 2). Tässä työssä ei ole kuitenkaan tarpeellista käydä läpi perusteellisesti koko konenäkölaitteiston suunnittelua, joten seuraavissa kappaleissa käydään läpi vain kameroihin ja valaistukseen liittyviä asioita.

5.4.2 Kamerate konenäköjärjestelmissä

Konenäköjärjestelmissä käytettäviä kameroita on olemassa paljon erilaisia eri käyttötarkoituksiin. Kameran valinta vaikuttaa keskeisesti järjestelmän toimintaan, sekä muiden komponenttien valintaan. Konenäkökameroita voidaan luokitella erilaisiin päätyyppeihin käyttötarkoituksen, kennon tai muiden ominaisuuksien perusteella. Konenäkökameroiden perusjakona voidaan pitää luokittelua 2D- ja 3D-kameroihin, jotka eroavat toisistaan niin rakenteellisesti, kuin käyttötarkoitukseltaankin. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Kamerate voidaan jakaa kennon rakenteen perusteella kahteen päätyyppiin, viiva- ja matriisikameroihin. Matriisikamera on tavallisin kameratyyppi ja sitä käytetään yleisesti eri automaatiosovelluksissa. Matriisikameroiden säätäminen ja käyttöönotto on huomattavasti helpompaa viivakameraan verrattuna. Viivakameroille on kuitenkin tietyt käyttökohteet, joihin ne soveltuvat matriisikameraa paremmin. Esimerkiksi jatkuvien kappaleiden kuvaus toteutetaan usein viivakameralla, jolloin saavutetaan parempi resoluutio matriisikameraan verrattuna. Kamerate voidaan jakaa kennotyyppin mukaan CCD- ja CMOS-kameroihin. Nykyisin suurin osa kameroista perustuu CMOS-kennoon. Lisäksi CMOS-

kamerat luokitellaan elektronisen sulkimen toimintaperiaatteen mukaan ”rolling shutter” ja ”global shutter” -kameroihin. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Kameran valinta järjestelmään on vaativa tehtävä, sillä kameraan liittyviä muuttujia ja valintaan vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, minkä lisäksi valinta vaikuttaa voimakkaasti myös järjestelmän muihin komponentteihin. Kameran valinnassa ensimmäisenä päätehtään, käytetäänkö 2D- vai 3D-kameraa. 3D-kamerat eroavat huomattavasti 2D-kameroista ja niihin liittyy suuret määrät teoriaa, joten niitä ei käsitellä tässä työssä sen tarkemmin. Kameran kennon muoto valitaan sovelluksen mukaan. Viivakamera soveltuu erityisen hyvin jatkuville ja yksittäisille liikkuville kappaleille, kuten pyörivät sylinterimäiset osat tai tuotantolinjassa jatkuvana kappaleena liikkuva tavara, esimerkiksi vaijeri. Muissa tapauksissa käytetään yleensä matriisikameroita. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Kameraa valittaessa määritetään tarvittava kameran näkökenttä (FOV). Näkökentän määrittämiseen vaikuttavat kuvattavan kappaleen maksimikoko, suurimmat mahdolliset siirtymät ja kiertymät kuvausalueella, haluttu kuvan marginaali, sekä kameran kuvasuhde. Näkökenttä lasketaan edeltävien tekijöiden summana. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Kameran resoluutioon liittyviä käsitteitä ovat kennon resoluutio, erottelukyky ja mittaus-tarkkuus. Kennon resoluutio ilmoitetaan pikseleinä. Kameran erottelukyky mitataan mil-limetreinä per pikseli. Kameran mittaustarkkuus ilmoittaa pienimmän kuvassa havait-tavan yksityiskohdan koon. Matriisikameran tarvittava resoluutio määritetään kaavassa (1): (Hornberg 2017, Kappale 2)

$$R_c = \frac{FOV}{R_s} = FOV \cdot \frac{N_f}{S_f}, \quad (1)$$

missä R_c on kennon pysty- tai vaakaresoluutio [pikseli]

R_s on kennon erottelukyky [mm/pikseli]

FOV on kameran näkökenttä [mm]

S_f on pienimmän yksityiskohdan koko [mm] ja

N_f on pikselien määrä pienimmän yksityiskohdan kuvaamiseen [pikseli].

Kameran alustava tyyppi voidaan valita, kun kennon muoto, tyyppi ja resoluutio on määriteltä. Kameran malliin vaikuttavia tarkennuksia ja ominaisuuksia ovat lisäksi valinta

mustavalko- tai värikameravaihtoehtoista, kameran liitännät, suljintyyppi, koko, hinta ja saatavuus. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Konenäköjärjestelmissä käytetään usein erillistä kuvankaappauskorttia (frame grabber), joka valitaan yhteensopivaksi kameran kanssa tai toisinpäin. Myös muiden komponenttien sopivuus on varmistettava, esimerkiksi käyttöjärjestelmän yhteensopivuus kameran kanssa. Kamerate tuottavat konenäkösovelluksissa usein suuret määrät dataa, joten keskusyksikön ja käytettyjen tiedonsiirtoväylien suorituskyvyn riittävyys tulee varmistaa. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Konenäkökameroissa voi olla sisäänrakennettu objektiivi, mutta useissa malleissa objektiivi valitaan erikseen. Objektiivin valinta aloitetaan valitsemalla sopiva polttoväli, kun tiedetään käytetyn kameran resoluutio ja näkökenttä. Standardiobjektiivien polttovälejä ovat esimerkiksi 8, 16, 25, 35 ja 50 mm. Tarvittava polttoväli voidaan arvioida alustavasti, kun tiedetään objektiivin suurennus ja etäisyys kuvattavasta kappaleesta. Kun kamerassa käytetään koko näkökenttää, voidaan suurennus laskea kaavalla (2): (Hornberg 2017, Kappale 2)

$$\beta = -\frac{s}{\text{FOV}}, \quad (2)$$

missä β on objektiivin suurennus
 s on kennon koko [mm].

Arvio tarvittavasta polttovälistä saadaan nyt kaavalla (3):

$$f' = a \cdot \frac{\beta}{1-\beta}, \quad (3)$$

missä f' on polttoväli [mm]
 a on objektiivin etäisyys kuvattavasta kappaleesta [mm].

Objektiivin polttoväli valitaan mahdollisimman lähelle laskettua arviota. Juuri sopivaa polttoväliä ei kuitenkaan yleensä löydy, jolloin joudutaan laskemaan uusi etäisyys objektiivin ja kappaleen välillä. Etäisyys lasketaan kaavasta (4): (Hornberg 2017, Kappale 2)

$$a = f' \cdot \frac{1-\beta}{\beta}, \quad (4)$$

Objektiivin valintaan vaikuttavat myös monet muut seikat. Valinnassa on otettava huomioon objektiiville määritelty maksimi kennon koko, sillä liian pienelle kennolle suunniteltua objektiivia käytettäessä kennon valotus jää puutteelliseksi. Myös objektiivin laatuun tulee kiinnittää huomiota. (Hornberg 2017, Kappale 2)

5.4.3 Valaistus konenäköjärjestelmissä

Konenäköjärjestelmiin tarvitaan yleensä jonkinlainen valaistusratkaisu, jolla mahdollistetaan käytettävän kameran kunnollinen suorituskky. Valaistuksen valinta on usein haasteellinen tehtävä, sillä valinnan perusteena olevan teorian lisäksi tarvitaan usein myös eri komponenttien kokeilua ja vertailua.

Valaistuksella parannetaan kameran kennon signaalin ja kohinan suhdetta, ja pyritään mahdollistamaan kuvien optimaalinen kontrasti. Valaistus määrittää siis hyvin pitkälti, miten yksityiskohtaisia kuvia kamera kykenee ottamaan. Kontrastiin vaikuttavia päätekijöitä ovat valaisuksen suunta, sekä valon väri ja polarisaatio. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Valaistusjärjestelmän toimintaperiaate voi perustua kohtisuoraan valaisukseen tai taustavalaistukseen. Kohtisuorassa valaistuksessa voidaan käyttää erilaisia tekniikoita, joista yleisimpiä ovat valon hajauttaminen käyttämällä diffuusoria, suunnattavien valaisimien ja heijastimien käyttö, sekä tummiin tai kirkkaisiin alueisiin perustuvat tekniikat. Taustavalaistuksessa valaisin on kamerasta katsottuna kappaleen takana tai tasossa. Taustavalaismet ovat yleensä diffuusivalaisimia. (Hornberg 2017, Kappale 2)

Yleisimmät konenäkövalaisimissa käytetyt valaisintekniikat ovat loistelamput, halogeeni- ja ksenonvalaisimet, sekä LED-valaisimet. Lisäksi myös laser-valoa voidaan käyttää erikoistapauksissa. Nykyisin LED-valaisimet ovat tärkeimpiä konenäkövalaisimia, sillä niiden käyttöikä on loiste- ja halogeenivaloihin verrattuna moninkertainen, ja ne ovat tehoonsa nähden pienikokoisia. LED-valoja voidaan käyttää usein ns. strobo-tilassa, jolloin saavutetaan korkea valon kirkkaus. (Hornberg 2017, Kappale 2)

5.5 Sähkömoottorit ja niiden ohjaus

Automaattisissa laitteissa käytetään usein erilaisia sähkömoottoreita, jotka pyörittävät esimerkiksi kuljettimia tai pumppuja. Sähkömoottorikäytön toteuttamiseen on tarjolla

monipuolisesti erilaisia vaihtoehtoja, joita yleisimmät ovat 1- tai 3-vaiheiset oikosulkumoottorit, kestromagneettimoottorit, AC- ja DC-servomoottorit, askelmoottorit, sekä harjalliset ja harjattomat DC-moottorit. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 230) Tässä kappaleessa tutustutaan lyhyesti erilaisiin moottorityyppeihin ja niiden ohjaustapoihin.

5.5.1 Oikosulkumoottorit

Oikosulkumoottori, toiselta nimeltään asynkronimoottori, on yleisin teollisuuden moottorityyppi. Oikosulkumoottorit ovat toimintavarmoja ja ne tarvitsevat vain vähäistä huoltoa. Lisäksi oikosulkumoottorit ovat kattavasti standardisoituja, joten sopivan moottorin löytäminen eri valmistajilta on helppoa. Teollisuudessa oikosulkumoottorit ovat usein 3-vaiheisia, mutta myös 1-vaihdemoottorit ovat yleisiä. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 232)

Oikosulkumoottorin ohjaus voidaan toteuttaa käyttämällä erilaisia käynnistimiä tai taajuusmuuttajaa. Moottorin yleisimmät käynnistysvaihtoehdot ovat suora käynnistys, tähtikolmiokäynnistys ja pehmokäynnistimen käyttö. Nykyisin oikosulkumoottoreita käytetään kuitenkin useimmiten taajuusmuuttajalla, joista tarkemmin myöhemmässä kappaleessa. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 236-240)

5.5.2 Kestomagneettimoottorit

Kestomagneettimoottorien rungon ja staattorin rakenne on samankaltainen oikosulkumoottorien kanssa, mutta roottori on toteutettu kestromagneeteilla eikä siinä ole näin ollen erillistä käämitystä. Kestomagneettimoottorin tärkeimpiä ominaisuuksia oikosulkumoottoreihin verrattuna ovat esimerkiksi pienemmät roottorihäviöt, alhaisempi käyntilämpötila ja huollon tarve, parempi tehopainosuhde ja pienempi moottorikoko. Kestomagneettimoottoria ei voi kuitenkaan ohjata ilman taajuusmuuttajaa. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 241)

5.5.3 Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajia käytetään oikosulkumoottorien ohjaukseen. Moottorin käyttämän vaihtovirran taajuutta muuttamalla voidaan säätää moottorin pyörimisnopeutta. Taajuusmuuttajan toiminta perustuu syötetyn vaihtosähkön tasasuuntaamiseen, jonka jälkeen se vaihtosuunnataan, eli muutetaan takaisin vaihtosähköksi. Tuotetun vaihtosähkön taajuus on nyt kuitenkin valittavissa. Taajuusmuuttajasta saatavasta vaihtosähköstä on huomattava,

ettei jännite ole yleensä sinimuotoista, vaan se muistuttaa pulssileveysmoduloitua (PWM) signaalia. PWM-jännite saa kuitenkin moottorin käämeissä aikaan lähes sinimuotoisen virtakäyrän. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 239-240)

Taajuusmuuttajat mahdollistavat monipuolisen moottorin säädön ja niitä voidaan käyttää takaisinkytkettynä tai ilman. Taajuusmuuttajaa voidaan käyttää myös servokäytössä. Taajuusmuuttajakäytöissä on huomioitava tiettyjä asioita verrattuna oikosulkumoottorin suoraan käyttöön. Moottorin lämpökäyttäytyminen saattaa muuttua ja erityisesti alhaisilla kierrosnopeuksilla moottorin jäähtyminen on varmistettava. Moottorin käyntiääni ja värinä saattavat myös kasvaa. Lisäksi taajuusmuuttajakäytöissä tulee kiinnittää sähköisten häiriöiden takia erityistä huomiota oikeanlaisiin moottorikaapeleihin. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 240)

5.5.4 Servomoottorit

Servomoottoreiksi luetaan moottorit, jotka ovat takaisinkytkettyjä, ja jotka yhdistetään säätimeen. Servomoottorit mahdollistavat korkean tarkkuuden, sekä hyvän ja hallittavan dynamiikan. Servomoottoreita on monen tyyppisiä, mutta nykyisin automaatiojärjestelmissä käytetään pääasiassa AC-servomoottoreita. AC-servomoottori on oikosulkumoottoriin verrattuna kokoonsa nähden tehokas ja sen akselin hitausmomentti on pienempi. AC-servomoottorissa ei välttämättä tarvita myöskään puhallinta helpon lämmönhallinnan ansiosta. Moottorin momentti on suuri myös nollanopeudesta lähtien. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 243-244)

5.5.5 Askelmoottorit

Askelmoottoreilla voidaan toteuttaa laiteohjauksia, joissa tarvitaan tarkkaa paikoitusta, mutta servomoottoreihin verrattuna niissä ei kuitenkaan yleensä käytetä enkooderia. Askelmoottorissa pyörimisliike toteutetaan nimen mukaisesti ottamalla pieniä askelia, joita on esimerkiksi 200 kappaletta yhdellä kierroksella. Tässä tapauksessa yhden askeleen pyörittämä kulma on siis 1,8 astetta. Askelmoottorin roottorilla ja staattorilla on erityinen hammasrakenne, jolla staattorin käämejä ohjaamalla askellusliike saadaan aikaiseksi. Askelmoottori kykenee rakenteensa ansiosta myös pitämään tarkasti paikkansa, mutta tässä tulee huomioida moottorin lämpeneminen. (Meier 2020)

Askelmoottorit vaativat toimiakseen askelmoottoriohjaimen. Ohjaamiseen on useita olemassa tapoja; esimerkiksi täysaskelilla saavutetaan suurin vääntö, kun taas mikroaskelilla käynti on tasaisempaa. Askelmoottorit ovat erittäin käytetty moottorityyppi automaatioissa ja niitä löytyykin esimerkiksi 3D-tulostimista, CNC-koneista ja roboteista. (Meier 2020)

5.5.6 DC-moottorit

Tasavirta- eli DC-moottoreita käytetään erityisesti akkukäyttöisissä sovelluksissa tai paikoissa, joissa vaihtosähköä ei ole helposti saatavilla. Käyttöjännite voi olla esimerkiksi 12 VDC, 24 VDC tai 48 VDC. Myös huomattavasti suurempia jännitteitä voidaan käyttää, kuten 250–600 VDC, jolloin moottorin teho on yleensä jo satoja kilowatteja. Tasavirtamoottorit voidaan luokitella harjallisiin ja harjattomiin tyyppeihin. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 230)

DC-moottorien luokittelu harjallisiin ja harjattomiin perustuu niiden rakenteeseen. Harjallisissa moottoreissa virta välittyy kommutaattorille hiiliparin eli harjojen välityksellä. Hiilet aiheuttavat moottorissa häviöitä ja ääntä, minkä lisäksi ne voivat häiritä radiolaitteita. Harjalliset moottorit myös lämpenevät enemmän kuin harjattomat. Harjattomassa moottorissa taas ei ole ollenkaan hiiliä, vaan moottoria ohjataan erillisellä ohjaimella ja moottorissa ei ole siten myöskään hiilistä johtuvia haittoja. Harjattoman moottorin ohjain toimii elektronisena moottorin kommutaattorina. Ohjain mittaa moottorin vaihetta usein hall-antureilla, mutta mittaus voidaan toteuttaa myös tarkkailemalla moottorin käämiä, joka on johtamattomassa tilassa. (Keinänen & Sumujärvi 2019, s. 230-231)

6 JYVIEN KUVAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Edellisissä kappaleissa on tutustuttu koneensuunnittelun periaatteisiin, sekä erilaisten laitteiden ja osakomponenttien toiminnan teoriaan. Jyvien konenäkö tarkastukseen liittyviä tutkimuksia on löydetty myös useita, ja ne antavat hyvin alustavia ideoita laitteiston toimintaperiaatteiden suunnitteluun. Aiheeseen liittyvän teorian tuntemus muodostaa suunnittelun pohjan ja määrittää, miten hyviä päätöksiä suunnittelussa voidaan tehdä. Tässä kappaleessa käydään läpi kuvauslaitteiston suunnittelun vaiheet ja varsinainen käytännön osuus, jossa laitteistosta rakennetaan prototyyppi.

6.1 Laitteiston suunnittelu

Laitteiston suunnittelu aloitetaan tutustumalla valmiina käytettävissä oleviin osiin ja tarvikkeisiin, sekä työkaluihin ja laitteisiin. Laitteisto toteutetaan tieto- ja sähkötekniikan osaston robotiikan laboratoriossa. Laitteiston kasaamiseen on käytössä laaja valikoima erilaisia perusosia, kuten ruuveja, sähköjohtimia ja muovilevyjä. Laboratoriossa on käytettävissä esimerkiksi valikoima perus- ja sähköasentajan työkaluja, porakone, juotos-asema, sekä kaksi 3D-tulostinta. Lisäksi käytettävissä ovat yliopiston FAB-labin ja pajan palvelut. Osien suunnittelussa käytetään Autodeskin Inventor ja Fusion 360 -ohjelmistoja. Työkaluihin ja laitteisiin tutustutaan aloittamalla yksinkertaisten testiosien valmistus, esimerkiksi 3D-tulostimien käyttö vaatii yleensä jonkin verran koneen erityispiirteisiin ja ohjelmistoihin tutustumista, ennen kuin kunnollisten osien valmistus onnistuu. Käytettävissä olevien työkalujen ja valmistusmenetelmien tuntemus helpottaa huomattavasti varsinaista suunnittelua, esimerkiksi 3D-tulostetuiden osien mitat ja sovitteet osuvat kohdilleen vähemmällä testailulla.

Laitteiston suunnittelussa noudatetaan melko löyhästi koneensuunnittelun tuotekehitysprosessin eri vaiheita, sillä laitteistosta ei tehdä vielä tässä vaiheessa varsinaista tuotetta, vaan työssä pysytään prototyyppiasteella. Työn kirjallisessa osuudessa on käyty läpi esimerkkejä jyvien käsittelylaitteista, minkä lisäksi myös erilaisten laitteistoissa käytettävien komponenttien teoriaan on perehdytty lyhyesti. Suunnittelussa edellä mainittuihin asioihin tutustuminen voisi lukeutua tuotekehitysprosessin esitutkimukseen ja osaltaan myös luonnosteluvaiheeseen. Tässä työssä ei toteuteta varsinaista tuoteohjelmaa, mutta työn suunnitteluvaiheen kulkua voidaan kuvata käyttämällä tuotekehitysprosessin termistöä.

Tuoteidea jyvien kuvaamiseen tarkoitetun laitteiston toteutukseen on tullut tutkimusyksikön sisältä ja sitä täydennetään aiheeseen liittyvistä tutkimuksista löytyneillä tiedoilla. Alustavasti kehitettävän laitteen tärkeimpänä vaatimuksena on ottaa kuvia automaattisesti eri jyvälajikkeista ja kuvien käyttökohteena on erityisesti konenäköalgoritmien opetus. Nimellisesti työn tuotekehitysehdotuksen tai -päättöksen aihe voisi siis olla yksinkertaisesti ”laite, jolla kerätään kuvia eri jyvälajikkeista konenäköalgoritmien opetukseen”. Laitteelle ei anneta vielä tässä vaiheessa tarkempia teknisiä ja taloudellisia vaatimuksia. Tarvittavien komponenttien hankinta päätetään miettiä tapauskohtaisesti.

6.1.1 Kuvattavat kappaleet

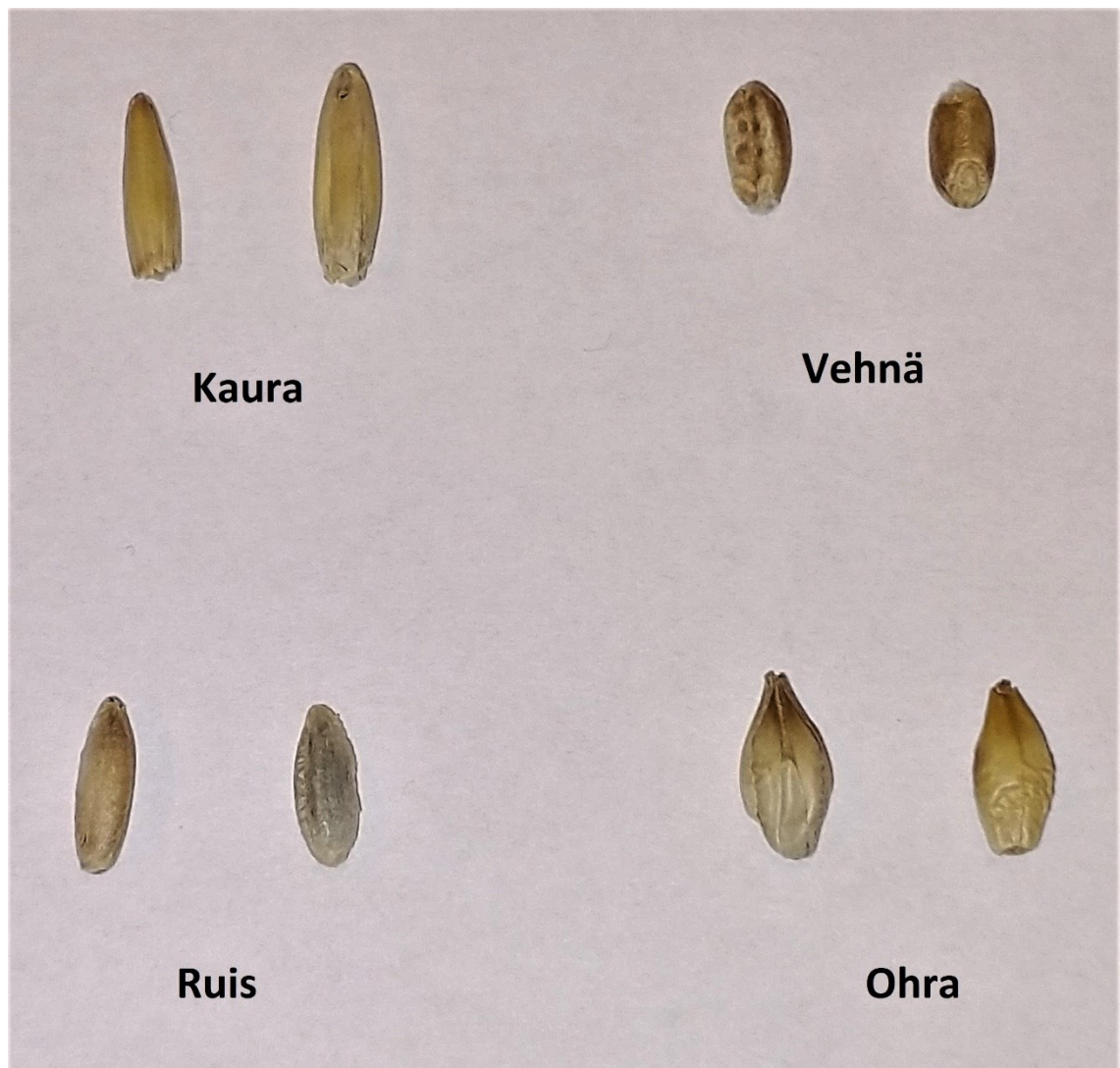
Ennen laitteiston luonnosteluvaiheen aloittamista on hyvä tutustua kappaleisiin, joita laitteella käsitellään. Laitteella on tarkoitus pystyä kuvamaan ensisijaisesti erilaisia viljoja, jyviä ja siemeniä. Tärkeimpinä kohteina ovat Suomessa kasvatettavat viljat, kuten vehnä, kaura, ohra ja ruis.

Kuvattavia jyvänäytteitä on saatu Luonnonvarakeskukselta useita pusseja, jotka ovat esitelty kuvassa 2. Näytteitä on kaurasta, vehnästä, rukiista ja ohrasta. Eri jyvälajeja on useilta eri kasvattajilta ja mukana on myös erikoisempia näytteitä, kuten kauran kuorta, kuorittua kauraa sekä vihertävää ruista. Isommissa pusseissa on noin puoli litraa jyviä, jotka laitteiston tulisi pystyä kuvaamaan järjestyksessä ajassa.



Kuva 2. Luonnonvarakeskukselta saadut jyvänäytteet.

Eri jyvälajikkeet ovat ulkonäöltään erilaisia ja niillä on omat erityispiirteensä. Kuvassa 3 on esiteltyä esimerkit perusviljoista ja siitä nähdään hyvin eri viljalajikkeiden tuntomerkit. Kaura on muodoltaan pitkulainen ja väriltään kellertävä. Vehnä on väritykseltään tummempi, rusehtava ja tai jopa hieman oranssin sävyinen. Ruis muistuttaa hyvin paljolti vehnää. Rukiin väritys voi vaihdella huomattavasti ja ruisnäytteissä onkin erikoisnäytteet vihertävästä ja rusehtavasta rukiista. Ohra on muodoltaan pisaramainen ja se vaikuttaa olevan usein pinnaltaan hieman ryppyinen. Ohrassa voi olla usein lisäksi kiinni osa vihneestä.



Kuva 3. Esimerkkejä eri viljalajeista.

Jyvänäytteet ovat tärkeitä jo suunnitteluvaiheessa, sillä niistä voidaan mitata esimerkiksi ulkomitat ja niiden käyttäytymistä voidaan tarkkailla eri pinnoilla. Fyysisten jyvänäytteiden käsittely helpottaa käytännön ideoiden keksimistä esimerkiksi laitteiston ja eri komponenttien kokoon ja toimintaan liittyen.

6.1.2 Luonnostelu

Luonnosteluvaiheessa laitteiston ideointi toteutetaan suurimmaksi osaksi piirtämällä käsin yksinkertaisia hahmotelmia laitteiston ja komponenttien toiminnasta. Luonnostelua täydennetään myös nopeiden prototyyppien valmistuksella, minkä 3D-tulostimet ja FAB-labin laitteet mahdollistavat.

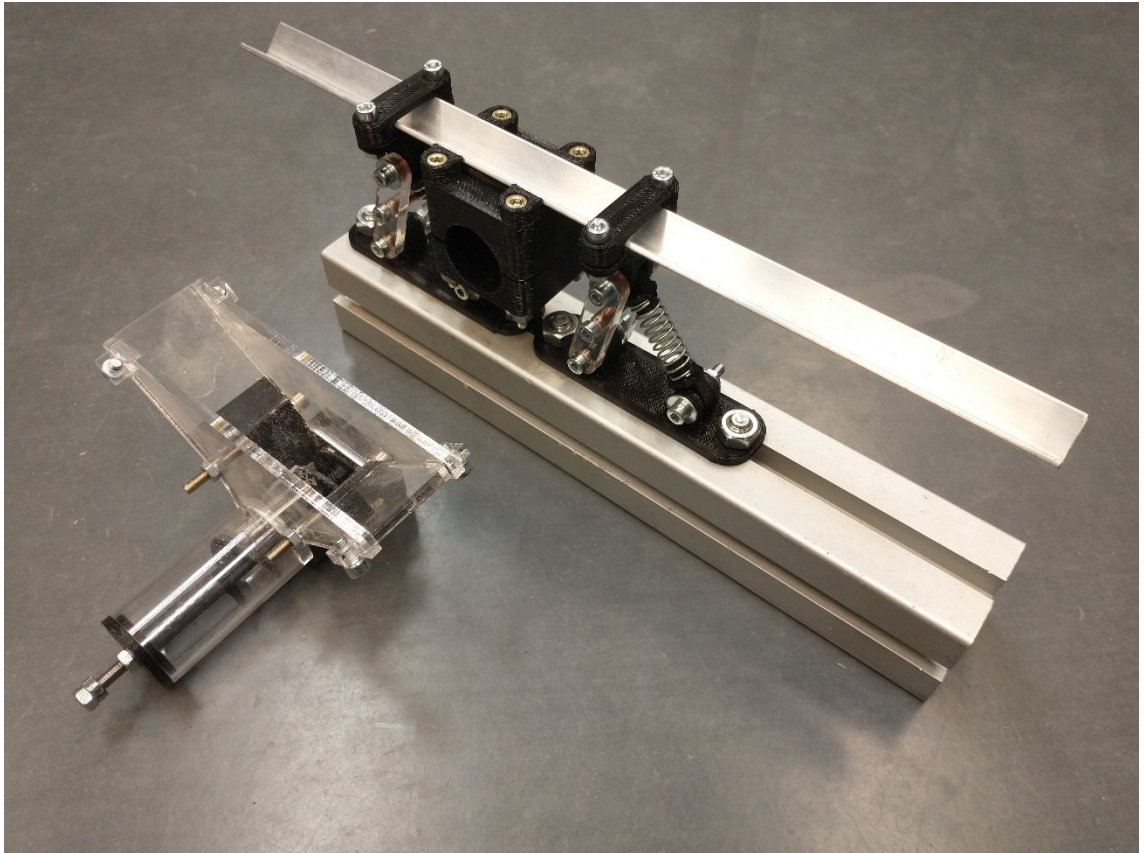
Luonnosteluvaiheessa mietitään ensin erilaisia ideoita jyvien käsittelyyn. Jyvien koko vaihtelee näytteen sisällä, minkä lisäksi myös eri lajikkeiden välillä on merkittäviä koeroja. Jyvät ovat kooltaan pieniä, mikä tuo käsittelyyn omat haasteensa. Jyvistä tulisi saada kuvia yksitellen, joten laitteiston tarvitaan jonkinlainen ratkaisu, jolla jyvät saadaan erilleen toisistaan. Jyvien erottelumekanismin suunnittelu osoittautuu huomattavan haasteelliseksi tehtäväksi.

Laitteesta halutaan kompaktin kokoinen, joten pieni ja yksinkertainen erottelulaite olisi paras ratkaisu. Tähän tehtävään valmiita jyvien erotteluun soveltuvia teollisia ratkaisuja ovat esimerkiksi maataloudessa käytetty viljojen vakuumitoiminen istutuslaite ja pienten kappaleiden käsittelyyn käytetty spiraalitärysyötin. Istutuslaite hylätään jo tässä vaiheessa käytännön ongelmien takia. Laite tarvitsisi tehokkaan vakuumitoimilaitteen, minkä takia se olisi erittäin äänekäs. Spiraalitärysyötin sopisi hyvin jyvien käsittelyyn, mutta valmiina laitteena hankittuna se olisi turhan suurikokoinen ja kallis.

Ideoinnissa lähdetään tarkastelemaan testilaitteistoja, joita on käytetty eri tutkimuksissa liittyen konenäköön erityisesti jyvien tapauksessa. Huomataan, että tutkimuksissa, joissa kuvaaminen toteutetaan erikoisratkaisulla, tekijät ovat suunnitelleet laitteistot yleensä käyttäen melko tavallisia materiaalinkäsittelyn toimilaitteita. Parhaaksi esimerkiksi valikoituu Pearsonin (2008) tutkimus, jonka laitteistossa on käytetty ruuvisyötintä ja tärykuljetinta.

Kuvauslaitteisto olisi perustoiminnaltaan hyvin yksinkertainen. Jyvät syötetään säiliöstä toisistaan eroteltuina kameroiden näkökenttään. Periaatteessa laitteisto voidaan toiminnallisesti siis jaotella jyvien syöttö- ja erotteluosaan, sekä kuvausosioon. Jyvien syöttö- ja erottelulaitteita lähdetään luonnostelemaan Pearsonin tutkimuksen inspiroimana. Jyvät olisivat jonkinlaisessa säiliössä, josta ne syötetään pienellä ruuvikuljettimella pienelle tärykuljettimelle. Tärykuljettimen kaukalo olisi V-mallinen, joka voidaan valmistaa kulma-

profiilista. Kuljettimista valmistetaan nopeasti prototyypit jo luonnosteluvaiheessa, jolloin saadaan tuntumaa omavalmisteisten laitteiden toimintaan ja 3D-tulosteiden mahdollisuuksiin. Prototyypit on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kuljettimien prototyyppejä.

Ruuvisyöttimen prototyyppiä on helppo testata pyörittämällä sen akselia porakoneella ja se todetaan tarpeeksi toimivaksi. Kuljettimen ruuvi on vielä tässä vaiheessa melko huonolaatuinen, mutta se toimii siitä huolimatta riittävän hyvin. Kuljettimessa on myös pieni suunnitteluvirhe, minkä takia sillä on taipumus jumiutua. Virheen huomaaminen tässä vaiheessa mahdollistaa kuitenkin korjaukset seuraaviin versioihin. Kuljettimen akseli on valmistettu nopeasti kierretangosta ja tuettu kuulalaakereilla. Akselin tuenta on kuitenkin riittämätön, mikä myös voidaan korjata tulevilla versioilla.

Tärykuljettimen prototyyppistä tuli hieman turhan monimutkainen, mutta sen valmistuksessa tutustuttiin hyvin 3D-tulostuksen mahdollisuuksiin ja rajoituksiin. Kuvassa kuljettimessa ei ole enää kiinnitettynä käyttömootoria, sillä samaa moottoria käytetään kuljettimen seuraavassa versiossa. Myös tärykuljetin toimii riittävän hyvin, vaikka se on valmistettu ilman tarkempia suunnitelmia ja laskelmia. Täryn rungon mekanismi todetaan kuitenkin huonoksi, sillä 3D-tulostuksessa käytetty PLA-muovi ei sovellu käytettäväksi

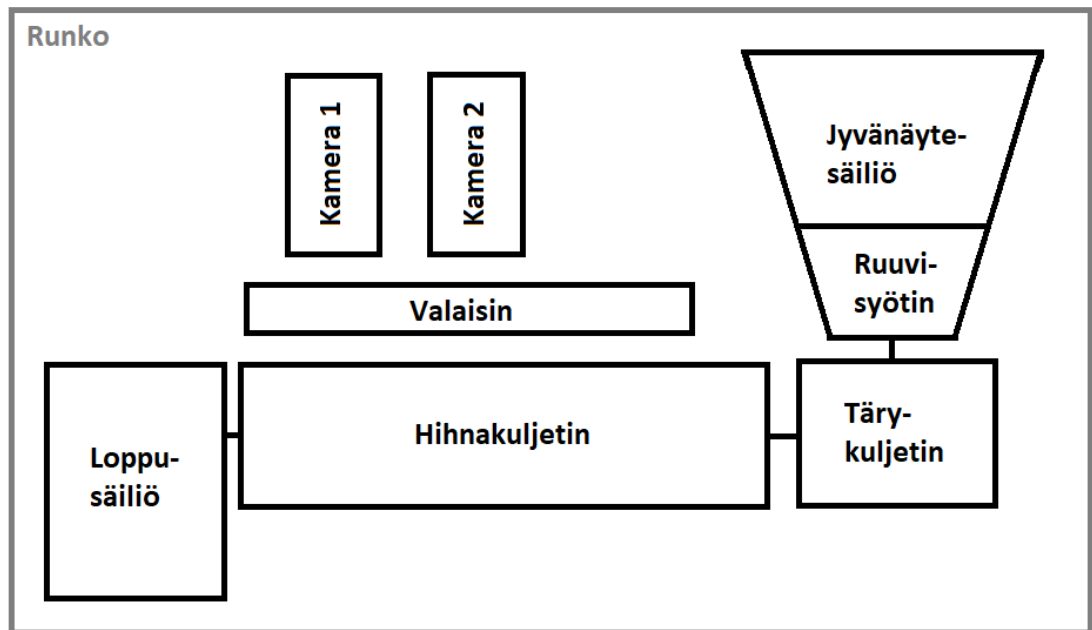
kuluissa osissa. Mekanismi löystyy liukulaakeroinnin kohdista jo lyhyen testikäytön jälkeen. Tärykuljetin ideana on kuitenkin hyvä ja sitä päätetään käyttää suunnittelussa.

Nyt luonnostelussa on ideoituna vaihtoehtoja jyvien syötölle ja erottelulle. Jyville pitää suunnitella myös jonkinlainen laitteiston osa, jossa jyvistä otetaan halutut kuvat. Kutsutaan kyseistä osaa tässä vaiheessa kuvausosioksi. Pearsonin (2008) laitteistossa jyvät putoavat tärykuljettimelta liukukouruun, jossa niistä otetaan kuvat anturin avulla liipaisemalla. Jyvät ovat laitteistossa siis käytännössä lähes putoamisliikkeessä. Suunniteltavan laitteiston vaatimuksia mietittäessä todetaan kuitenkin, että kyseinen ratkaisu ei ole tarpeeksi yleiskäyttöinen.

Kuvausosion luonnostelu aloitetaan miettimällä, mitä komponentteja varsinaiseen kuvaukseen tarvitaan. Laitteessa halutaan käyttää mahdollisesti useampaa kameraa, jotka ovat tyypiltään todennäköisesti jonkinlaisia teollisuuskameroita. Kameran vaativat toimiaakseen myös kunnollisen valaistuksen, jonka toteutukseen on useita vaihtoehtoja. Jyvät täytyy kuljettaa jotenkin kameran tai kameroiden näkökentän läpi. Tähän tarkoitukseen soveltuu erityisesti perinteinen hihnakuljetin. Myös syöttölaitteiston tärykuljetinta voisi periaatteessa käyttää tähän, mutta ongelmaksi voi tulla värinän aiheuttama jyvien nopea liike. Tärykuljettimen prototyyppiä testattaessa on huomattu myös, että jyvien saaminen erilleen toisistaan kuljettimen kaukalossa on hankalaa tai mahdotonta. Hihnakuljetinvaihtoehtoja tarkasteltaessa huomataan jo tässä vaiheessa, että hihnan värillä on suuri merkitys kuvien onnistumiseen. Jyvät ovat väriltään vaaleita, joten kontrastin maksimoimiseksi tulisi kuvien taustana toimivan hihnan olla mahdollisemman tumma.

Luonnosteluvaiheessa selaillaan erilaisia valmiita osia ja komponentteja, joita laitteistossa voitaisiin käyttää. Laitteiston rungossa päädytään jo tässä vaiheessa käyttämään helppouden ja muunneltavuuden vuoksi alumiiniprofiilia. Erilaisia valmiita kuljetinratkaisuja etsitään eri toimittajilta, mutta huomataan, että kuljettimet ovat käytännössä poikkeuksetta turhan suurikokoisia tähän käyttötarkoitukseen. 3D-tulostamalla voidaan kuitenkin valmistaa myös kuljettimiin tarvittavia erikoisosia, minkä lisäksi osia voidaan valmistaa myös yliopiston pajalla.

Erilaisten ideoiden tuloksena muodostetaan alustava luonnosvaihtoehto laitteiston toiminnasta ja eri komponenteista, sekä niiden sijoittelusta. Laitteiston luonnos on esitetty kuvassa 5, josta nähdään eri komponenttien alustavaa sijoittelua toisiinsa nähden. Luonnoksesta nähdään myös laitteiston alustava perustoimintorakenne.



Kuva 5. Laitteiston luonnos.

6.1.3 Vaatimuslista

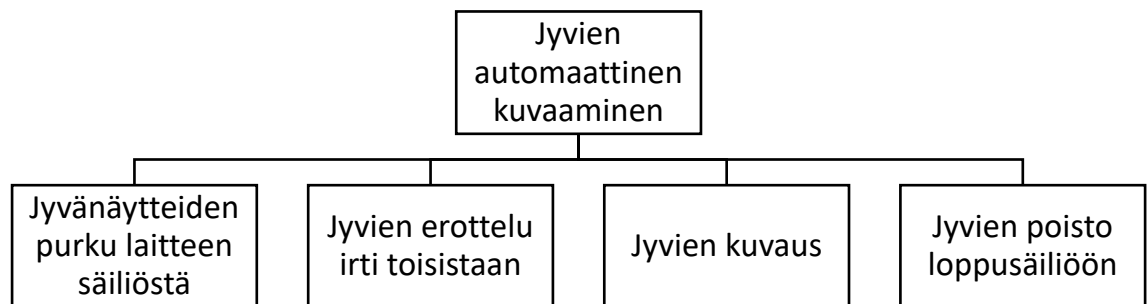
Laitteistolle määritellään erilaisia vaatimuksia ennen suunnittelutyön aloitusta ja sen aikana. Myös laitteen toimintaan liittyviä toivomuksia on esitetty useita ja vaatimuslista on päivittynyt ja muuttunut voimakkaasti suunnittelun aikana. Monet alussa esitetyistä vaatimuksista ovat muuttuneet toivomuksiksi, sillä niiden toteuttaminen vaatisi turhan paljon aikaa diplomityöltä. Tässä työssä vaatimuslistan laadinnassa tulee huomioida, että laitteesta ei tehdä lopullista tuotetta, vaan prototyyppi, joka on osana opinnäytetyötä. Tästä johtuen myös vaatimuslista on vielä tässä vaiheessa hyvin vapaamuotoinen ja siinä ei oteta sen kummemmin kantaa esimerkiksi normeihin, standardeihin ja määräyksiin. Vaatimuslista on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vaatimuslista

Kiinteät vaatimukset
Laitteiston tulisi olla riittävän turvallinen käyttää, säätää ja huoltaa. Tässä huomioidaan, että laitetta ei käytä tässä vaiheessa kukaan muu kuin koulutettu henkilö
Laitteiston asennuksissa tulee noudattaa yleistä huolellisuutta ja kokoonpanossa ja osien valmistuksessa pyritään riittävään laatuun
Vähimmäisvaatimukset
Laitteiston tulee kyetä ottamaan kuvia jyvistä siten, että jyvät koskettavat toisiaan mahdollisimman vähän
Kuvattavat jyvälajikkeet: kaura, vehnä, ohra ja ruis
Kuvauskapasiteetti: Jyvänäyte (5 dl), tulee pystyä käymään läpi järkevässä ajassa, esimerkiksi n. 30 min
Laitteeseen halutaan käyttöliittymä, jolla laitteiston toimintaa voidaan säätää helposti
Toivomukset
Prototyyppivaiheessa laitteistoa olisi hyvä pystyä muuntelemaan tarpeen mukaan
Useiden kameroiden asennus samanaikaisesti
Mahdollisuus liipaisusignaalille
Hiljainen käyntiäni
Kompakti koko, helppo kuljetettavuus
Muiden kappaleiden kuvaus, esimerkiksi riisi ja muut siemenet. Myös marjojen kuvauksen mahdollisuutta tulee harkita
Erilaiset rajapinnat ulkopuolisten laitteiden kanssa, esimerkiksi erillisen tietokoneen liittämiseen
Teollisuusympäristöön sopivat asennukset, komponentit ja muut yksityiskohdat
Mahdollisuus asentaa myöhemmin esimerkiksi paineilmatoiminen lajittelulaite
Komponentteja olisi hyvä pystyä käyttämään muissa projekteissa

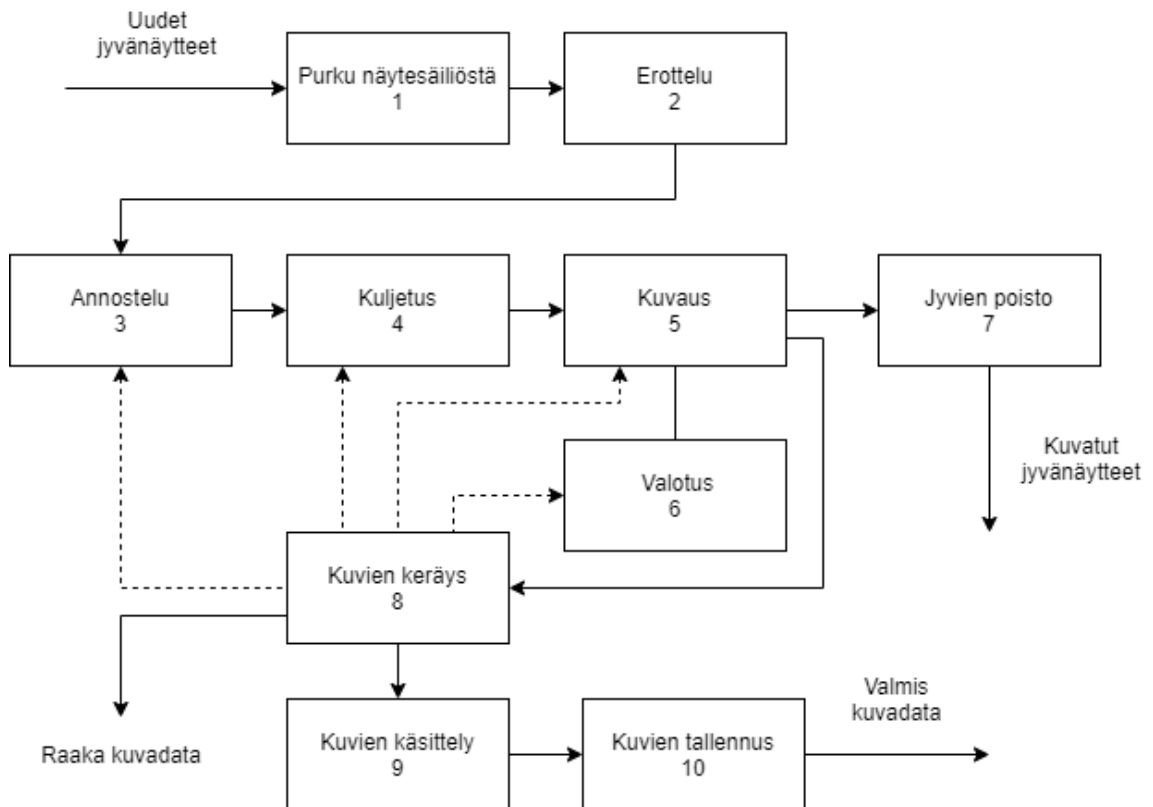
6.1.4 Toimintorakenne

Nyt laitteistoa suunniteltaessa on tehty luonnostelua ja selvitetty laitteistolle asetettuja vaatimuksia, eli tässä vaiheessa tiedetään jo kohtalaisen hyvin, mitä laitteistolla halutaan pystyä tekemään. Seuraavaksi suunnittelussa voidaankin lähteä muodostamaan laitteiston toimintorakennetta. Toimintorakenteen pohjana voidaan pitää laitteiston toimintokuvausta, joka esitetty kuvassa 6. Kuvasta huomataan, että tämän laitteen perustoimintokuvaus on vielä tässä vaiheessa erittäin yksinkertainen. Jyvänäytteet puretaan jonkinlaisesta säiliöstä ja syötetään yksitellen kuvausosion läpi, josta ne siirtyvät loppusäiliöön.



Kuva 6. Laitteiston toimintokuvaus.

Toimintokuvaus kertoo vain laitteiston perustehtävät yleisellä tasolla. Toimintokuvaus helpottaa kuitenkin laitteiston tehtävien määrittelyä ja rajausta, ja sen perusteella voidaan laatia erilaisia tarkempia toimintorakenteita. Kuvassa 7 on esitetty laitteistolle määritelty toimintorakenne. Kuvasta huomataan, että myös varsinainen toimintorakenne on melko yksinkertainen, mutta toimintokuvaukseen verrattuna siitä nähdään jo paljon tarkemmin laitteen todellinen toimintaperiaate ja eri osatoiminnot.



Kuva 7. Laitteiston toimintorakenne.

Toimintorakenteessa ensimmäisenä laitteiston säiliö täytetään jyvänäytteillä. Tämä vaihe ei ole mukana varsinaisissa laitteiston toiminnoissa, sillä tässä vaiheessa jyvänäytteet lisätään laitteeseen manuaalisesti. Myöhemmissä laiteversioissa toimintorakennetta voidaan päivittää, jos myös laitteiston säiliön täyttö halutaan automatisoida. Ensimmäisenä laitteiston varsinaisena osatoimintona on jyvien purku näytesäiliöstä (1). Seuraavaksi jyvät erotellaan irti toisistaan (2) ja annostellaan (3) kuljettimelle. Kuljetin (4) siirtää jyvät laitteiston kuvausosioon, jossa suoritetaan jyvien kuvaus (5). Kuvauksessa valotus (6) on eritelty omaksi osatoiminnokseen. Kuvauksion jälkeen jyvät poistuvat (7) laitteistosta kuvattujen jyvänäytteiden loppusäiliöön. Kuvausvaiheesta (5) saadaan kerättyä kuvia (8), minkä lisäksi keräysalgoritmin yhteyteen voidaan lisätä erilaisia toimintoja ohjauksen parametrien säätöön (katkoviivat). Kuvien keräyksessä saadaan aluksi raakakuvia, joita voidaan tarpeen mukaan viedä suoraan muihin tarkoituksiin. Raakakuville tehdään tarvittavia kuvankäsittelytoimenpiteitä (9), minkä jälkeen käsitellyt kuvat tallennetaan laitteen muistiin (10). Tallennettuja kuvia voidaan käyttää lopputarkoituksessa.

6.1.5 Osatoimintojen ratkaisuperiaatteet

Kun laitteiston toimintorakenne on hahmoteltu valmiiksi, voidaan lähteä etsimään ratkaisuperiaatteita eri osatoiminnoille. Osatoiminnot ovat numeroituna kuvan 7 toimintorakennekaavioon. Laitteiston perustoiminta on hyvin yksinkertainen, minkä takia tiettyjä osatoimintoja ja niiden ratkaisuperiaatteita on mietitty alustavasti hieman tarkemmin jo luonnosteluvaiheessa. Eri osatoiminnoille tulisi löytää useampi erilainen ratkaisuperiaate, joista kootaan mahdollisimman hyvä kokonaistoiminnon suorittava periaateyhdistelmä. Tässä työssä eri ratkaisuperiaateille ei tehdä tarkempaa arvostelua, vaan valinnat tehdään pitkälti toteutettavuuden ja komponenttien saatavuuden mukaan.

Ensimmäisenä osatoimintona on jyvien purku näytesäiliöstä (1). Tälle toiminnolle on etsitty eri vaihtoehtoja jo luonnosteluvaiheessa ja hyväksi vaihtoehdoksi valikoitui pienikokoinen ruuvisyötin. Ruuvisyötin on perinteinen materiaalinkäsittelyn komponentti ja siihen liittyviä esimerkkejä löytyy runsaasti. Ruuvisyötin on myös toimintavarma ja pienikokoisena käytännössä huoltovapaa, ja se toimii, vaikka tuloaukon kapasiteetti on hallitsematon. Valmiita ruuvisyöttimiä ei kuitenkaan kannata välttämättä hankkia tämän laitteen prototyyppiluonteisuuden vuoksi, minkä lisäksi hyvin pieniä ruuvisyöttimiä on huonosti tarjolla. Käytettävissä olevien 3D-tulostimien avulla voidaan kuitenkin valmistaa helposti ruuvisyötin prototyyppisiä. Myös varsinainen näytesäiliö sisältyy tähän toimintoon, joka sekin voidaan valmistaa käyttämällä 3D-tulostusta ja esimerkiksi muoviputkea.

Myös jyvien erotteluvaiheelle (2) on mietitty eri vaihtoehtoja jo luonnosteluvaiheessa. Jyvät tulevat ruuvisyöttimeltä epätasaisesti ruuvien nousun mukaan annoksina, joten tarvitaan ratkaisu, millä jyvät saadaan asettumaan erilleen ja mieluiten tiettyyn asentoon. Tähän tehtävään soveltuvat erilaiset tärykuljettimet. V-muotoisella kaukalolla varustettu tärykuljetin toimii hyvin prototyyppillä toteutetun testin perusteella. Tärykuljetin toteuttaa myös jyvien annosteluvaiheen (3), sillä sopivalla täyttöasteella jyvät putoavat kuljettimen kaukalosta yksitellen.

Jyvät pitää kuljettaa (4) kuvausvaiheeseen kameran näkökenttään. Tähän tarkoitukseen soveltuvat erilaiset kuljettimet, joista toimivaksi vaihtoehdoksi valikoituu eri esimerkkien perusteella perinteinen hihnakuljetin. Hihnakuljetin on erityisen hyvä tähän tarkoitukseen, sillä kuljettimen hihna toimii itsessään kuvaustaustana ja kuljettimen nopeutta sää-

tämällä voidaan hallita jyvien liikenopeutta kuvausalueella. Hihnakuuljetin on myös rakenteeltaan yksinkertainen ja hiljainen, minkä lisäksi se on erittäin monikäyttöinen. Hihnakuuljetin suorittaa myös jyvien poiston laitteesta (7), kun hihnakuuljetin purkupäähän lisätään säiliö kuvatuille jyville.

Kuvaukseen (5) voidaan käyttää erilaisia kameroita, joita on käsitelty tarkemmin konenäkökappaleessa. Tässä laitteistossa halutaan ottaa aluksi värikuvia ja kuvattavien kappaleiden liikkumisnopeudet ovat kohtalaisen korkeita. Alustavasti kameran olisi hyvä olla global shutter-tyyppinen, mutta myös rolling shutter-kameraa voidaan käyttää ainakin testivaiheessa. Tähän laitteistoon on valmiina suoraan käytettävissä The Imaging Sourcen rolling shutter-teollisuuskamera.

Kamera vaatii toimiakseen valaistuksen (6). Kuvien valaistukseen on useita vaihtoehtoja, joista tässä vaiheessa sopivimmat ovat kohtisuoraan valaistukseen perustuvat viiva- ja rengasvalot. Viivavalaja käytettäessä useamman kameran asennus on helpompaa. LED-valaisimet ovat pienikokoisia ja tehokkaita, ja niitä on saatavilla säädettävänä ja tietokoneohjattuina.

Kuvien keräys (8), käsittely (9) ja tallennus (10) voidaan hoitaa tietokoneella ja siinä olevilla ohjelmilla. Kuvien keräykseen on saatavilla myös erillisiä nopeita kuvankaappauslaitteita (frame grabber), mutta tässä laitteistossa semmoista ei välttämättä tarvita. Edellä mainitut vaiheet ovat suureksi osaksi ohjelmistoteknisiä ratkaisuja, joille voidaan kirjoittaa myöhemmässä vaiheessa kunnolliset ohjelmat. Tässä vaiheessa kuitenkin jo tiedetään, että kuvienkäsittelyvaiheessa olisi mahdollista myös säätää laitteiston toimilaitteiden ohjausta. Kuvien keräysvaiheesta saadaan tarvittaessa raakakuvadataa, esimerkiksi käsittelemätöntä videota. Käsitellyt kuvat voidaan tallentaa käytetyn tietokoneen kovalevylle tai ulkoiselle tallennusvälineelle, esimerkiksi muistitikulle.

6.2 Käytettävät komponentit

Nyt laitteistosta on tehty luonnostelut ja sille on laadittu toimintorakennekaavio, sekä osatoiminnoille on mietitty erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja. Osatoiminnoille ei määritelty varsinaisia arvostelukriteereitä, sillä erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja löydettiin melko vähän ja prototyyppivaiheen laitteessa niitä ei ole välttämättä tarpeellista edes laatia. Seuraavana

vaiheena olisi tuotteen kehitysvaihe eli konstruktointi. Osatoiminnoille valitaan lupavimmat ratkaisuvaihtoehdot, joista tuote koostuu.

Laitteisto koostuu selkeästi toisistaan erillisistä komponenteista, jotka voidaan suunnitella erillisinä osakokonaisuuksina. Laitteiston suunnittelu aloitetaan tarvittavien kuljettimien mallinnuksella, jonka jälkeen suunnitellaan alustava sähkö- ja automaatiojärjestelmä. Sähköasennukset vaativat ohjauskeskuksen, joka toimii tärkeänä suunnittelun lähtökohtana kokoonpanoa laadittaessa. Kuvauskomponentit asetellaan kokoonpanoon sopiville paikoille ja runkoon tehdään tarvittaessa muutoksia ja uusia kiinnityspisteitä. Kokoonpano suunnitellaan, kun kaikki tärkeimmät komponentit ovat valittuina.

6.2.1 Kuljettimet

Laitteistoon tarvitaan suunnitelman mukaisesti kolme erillistä kuljetinta. Kuljettimet ovat kooltaan pienikokoisia, mikä takaa valmiita kaupallisia ratkaisuja ei ole kovin hyvin tarjolla. Kuljettimia suunniteltaessa huomataan kuitenkin, että niiden valmistus itse onnistuisi riittävän helposti. Kuljettimiin on saatavilla kohtalaisesti valmiita osia, varsinkin hihnakuljettimiin on tarjolla esimerkiksi monenlaisia hihnapyöriä, hihnoja ja laakeripeisiä.

Kuljetinsuunnittelu aloitetaan hihnakuljettimen suunnittelulla ja samalla valitaan käytettävät moottorit. Moottorien valinnassa otetaan huomioon, että niitä tullaan todennäköisesti käyttämään muissa projekteissa, joten niiden mitoitus ei tehdä kovin tarkasti. Mitoituksessa vähimmäisvaatimuksena käytetään hihnakuljettimen haluttuja vaatimuksia. Moottorien valinnassa ylimateitus ei siis haittaa.

Laitteiston automaatiojärjestelmässä käytetään Beckhoffin komponentteja, sillä tutkimusyksikössä on asiantuntemusta kyseisten järjestelmien käyttöön. Ruuvisyöttimen ja hihnakuljettimen moottorit valitaan tämän takia myös Beckhoffin mallistosta. Tärykuljettimessa käytetään valmiina olevaa pientä Maxon Motorin DC-moottoria.

Beckhoff-järjestelmä hankitaan pakettina, johon otetaan mukaan kaksi AM8122-moottoria. Moottorit mitoitetaan Beckhoffin omalla mitoitussovelluksella, jossa käytetään arvioita hihnakuljettimen vaatimuksista, sillä siihen arvioidaan tulevan eniten kuormitusta eri käyttökohteissa. Hihnakuljettimen kuormaksi määritetään 10 kg ja siirtonopeudeksi 1 m/s 50 mm vetorummulla. Hihnakuljettimessa halutaan käyttää lisäksi myös kulmavaihdetta,

jonka avulla säästetään asennustilaa. Sovellus antaa erilaisia vaihtoehtoja moottoreille ja vaihteille, joista AM8122-sarjan servomoottorit täyttävät helposti vaaditut ominaisuudet. Kyseiset moottorit ovat teholtaan huomattavan paljon ylimitoitettu tämän työn kuvauslaitteeseen, mutta ne ovat kuitenkin fyysisiltä mitoiltaan sopivan kokoisia. Moottorin tyyppikilpi on esitetty kuvassa 8, ja siitä nähdään moottorin perusominaisuudet.



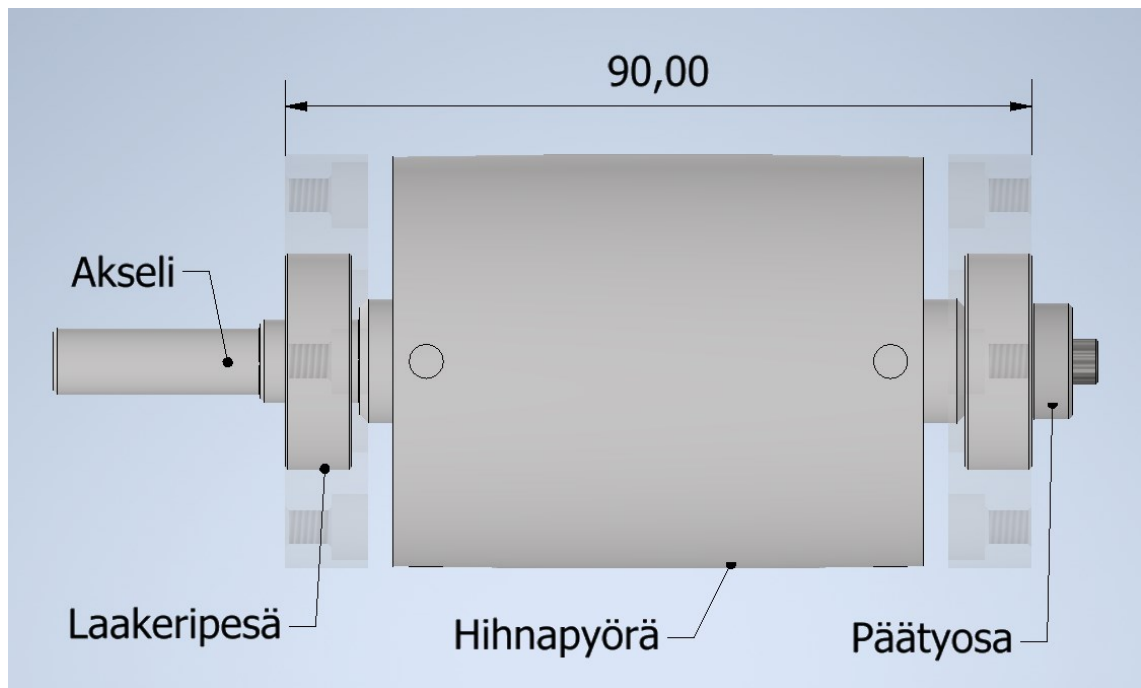
Kuva 8. Kuljettimissa käytetyn servomoottorin tyyppikilpi.

Hihnakuiljettimen suunnittelu aloitetaan etsimällä valmiita komponentteja, jotka olisivat sopivan kokoisia ja järkevän hintaisia. Ensimmäisenä etsitään sopivan kokoinen hihna ja siihen yhteensopivat hihnapyörät. Kuljettimen pituus määritetään tässä vaiheessa noin puoleen metriin, mikä mahdollistaa 2–3 kameran asentamisen hihnan yläpuolelle. Hihnan värius on tässä laitteessa erittäin tärkeässä osassa. Kuvattavat kappaleet, eli jyvät, ovat väriltään vaaleita, joten vastaavasti kuvaustaustan, eli hihnan, tulee olla väriltään tumma. Hihnoja on tarjolla useissa eri väreissä, joista tummia värejä ovat esimerkiksi musta, tummansininen ja tummanvihreä. Hihnoja on tarjolla myös erilaisilla pinnoilla tai pinnoituksilla, esimerkiksi kumipinnoituksella tai profiloidulla pitopinnalla.

Tässä vaiheessa tehdään vasta osien alustavia valintoja, joissa päätetään käytettyjen komponenttien tyypit, mutta lopullisia mittoja ei vielä tiedetä. Hihnaksi valitaan Misumin DHBLT-hihna, jossa on musta polyuretaanipinnoitus. Kyseistä hihnaa käytetään valmistajan mukaan esimerkiksi elektroniikkateollisuudessa. Hihnan leveys on valittavissa väliltä 5–500 mm ja pituus 0,5–20 m. Hihnapyöräksi valitaan Misumin valmistamat hihnapyörät, jotka voidaan tilata omien mittojen mukaan.

Hihnakuuljetin päätetään valmistaa mahdollisimman yksinkertaiseksi. Kuljettimen runkona käytetään 90 mm x 45 mm Minitec-alumiiniprofiilia, jonka yläpinnalle leikataan liukupinnaksi POM-levy, joten kuljettimessa ei tarvita päätypyörien lisäksi muita tukirullia. Misumilta saadaan myös hihnapyöriin sopivia akseleita. Hihnapyörien ja akselien kokojen, sekä vaihtoehtojen tarkastelun jälkeen voidaan valita myös akseleihin sopivat laakeriyksiköt. Nyt kaikista voimansiirron komponenteista on valittu alustavat vaihtoehdot, joten seuraavaksi voidaan aloittaa kuljettimen varsinainen mallintaminen.

Kuljettimen akseliväliksi valitaan 500 mm ja hihnapyörien halkaisijaksi 50 mm. Rungon leveys on nyt 90 mm, joten hihnapyörien ja laakeriyksiköiden tulee mahtua tälle leveydelle. Laakeriyksiköiksi valitaan Misumin BARN6000DD-yksiköt, jotka ovat muodoltaan pyöreitä ja niiden halkaisija on 50 mm, mikä on juuri sopiva valittujen hihnapyörien halkaisijan kanssa. Laakeripesät ovat leveydeltään 10 mm ja ne asennetaan hihnapyörien molemmin puolin, joten nyt voidaan hakea sopiva leveys hihnapyörille. 64 mm leveillä hihnapyörillä pyörien ja laakeripesien väliin jää 3 mm raot. Kuljettimeen valitaan Misumin ROBAC-sarjan hihnapyörät, joiden leveydeksi määritetään 64 mm ja halkaisijaksi 50 mm. Kyseinen hihnapyörä on hyvin yksinkertainen ja tavallisen mallinen 0,3 mm bobeeruksella varustettu alumiininen rulla. Hihnapyörä sopii 15 mm akselille, mikä mahdollistaa juuri sopivat olakkeet käytetyille laakereille. Akselin lopulliset mitat määritellään kokoamalla CAD-malli edellä mainituista osista, jolloin nähdään sopivatko osat toisiinsa ja onko suunnitelmassa muita vikoja. Käyttöpäähän valitaan Misumin KZDE-sarjan akseli ja vapaaseen päähän PSFRED-sarjan akseli. Akselit lukitaan paikoilleen Misumin EDCB10-päätyosilla. Käyttävän akselin pään halkaisijaksi tulee 8 mm, johon asennetaan moottorille yhdistävä kytkin. Käyttöpään kokoonpano on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Hihnakuojettimen käyttöpään osakokoonpano.

Akselikokoonpanot asetetaan CAD-malliin 500 mm akselivälille, jolloin nähdään sopiva pituus rungossa käytettävälle alumiiniprofiilipalkille. Runkopalkin pituudeksi tulee 400 mm, jolloin kuljettimessa on vielä sopivasti säätövaraa hihnan kiristystä ajatellen. Tämän mallisen kuljettimen hihnan pituudeksi tulee 500 mm akselivälillä ja 50 mm hihnapyörällä varustettuna:

$$2 \cdot 500 \text{ mm} + \pi \cdot 50 \text{ mm} = 1157,079 \dots \text{ mm}$$

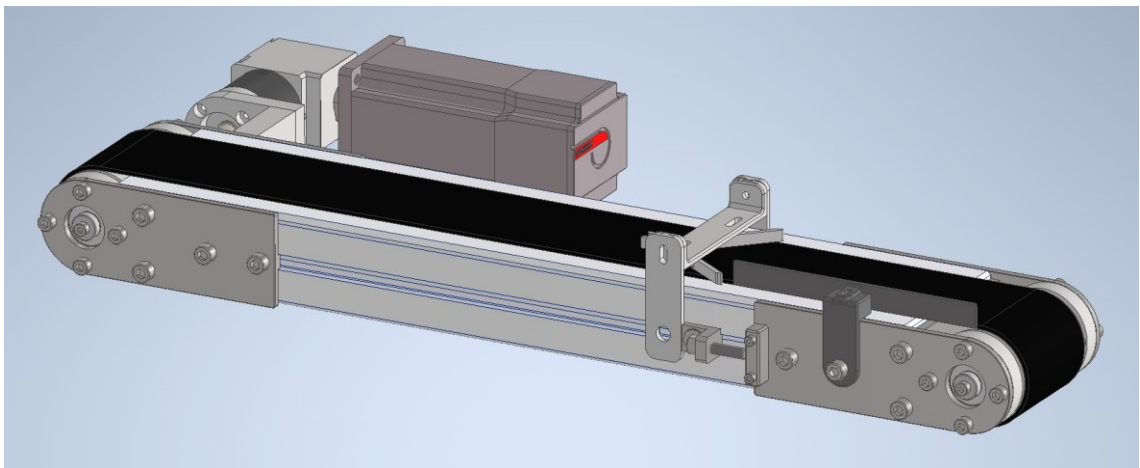
Valitun hihnapyörän leveys on 64 mm, joten sopiva hihnan leveys on noin 60 mm, jolloin hihnalla on pari millimetriä liikkumavaraa. Kuljetinhihna valitaan Misumin DHBLT-sarjasta, johon määritetään pituudeksi 1150 mm, leveydeksi 60 mm ja paksuudeksi 0,9 mm. Kyseisessä hihnasarjassa pituus voidaan määrittää senttimetrin tarkkuudella, joten pyöristys tehdään alaspäin. Hihna on pinnoitettu sähköä johtavalla polyuretaanilla, joka vähentää hihnalla olevien kappaleiden staattista sähköisyyttä. Hihnan runkomateriaalina on polyesteri.

Kuljettimen runkoon suunnitellaan osat, joihin laakeriyksiköt kiinnitetään. Kiinnitysosia tarvitaan neljä kappaletta. Käyttöpään osat ovat hieman erilaiset, kuin vapaan pään, sillä toisessa päässä tarvitaan myös lisäosat hihnan kiritysmekanisminne. Saman pään kiinnitysosaparit liitetään toisiinsa yksinkertaisilla alumiinipalikoilla, joissa on neljä kierre-

reikää. Kiinnityksiin voidaan tehdä uriin sopivat ulokkeet, jolloin ne muodostavat eräänlaisen kelkan, joka liukuu profiilipalkin suuntaisesti. Edellä mainittu kiristysmekanismi asennetaan alumiiniprofiilin uriin. Suunnitellut osat valmistetaan alumiinista yliopiston pajalla.

Profiilin urat mahdollistavat myös muiden osien kiinnityksen kuljettimen runkoon. Hihnan päälle suunnitellaan yksinkertaiset ohjurit jyvälle, ja ne valmistetaan 3D-tulostamalla. Kuljettimen päälle kiinnitetään myös 3D-tulostettu sivuohjauslevy, joka estää jyvien ajautumisen pois hihnalta syöttövaiheessa.

Käyttömootorina on edellä mainittu Beckhoffin moottori, johon liitetään lisäksi tilan säästämiseksi ja moottorin väännön lisäämiseksi Beckhoff WPLE040-kulmavaihte, jonka välityssuhde on 1:4. Vaihte valitaan Beckhoffin valintasovelluksen avulla ja moottori, sekä vaihte toimitetaan valmiiksi kasattuna pakettina. Hihnakuljettimen käyttöpäässä on nyt vapaa akselinpää, johon moottorikokoonpano liitetään kytkimellä. Toisena vaihtoehtona olisi käyttää holkkiakselilla varustettua vaihdetta, jolloin ei tarvittaisi erillistä kytkintä ja vaihteen kiinnitys olisi yksinkertaisempi. Hihnakuljetinkokoonpano käyttömootoreineen on esitetty kuvassa 10.



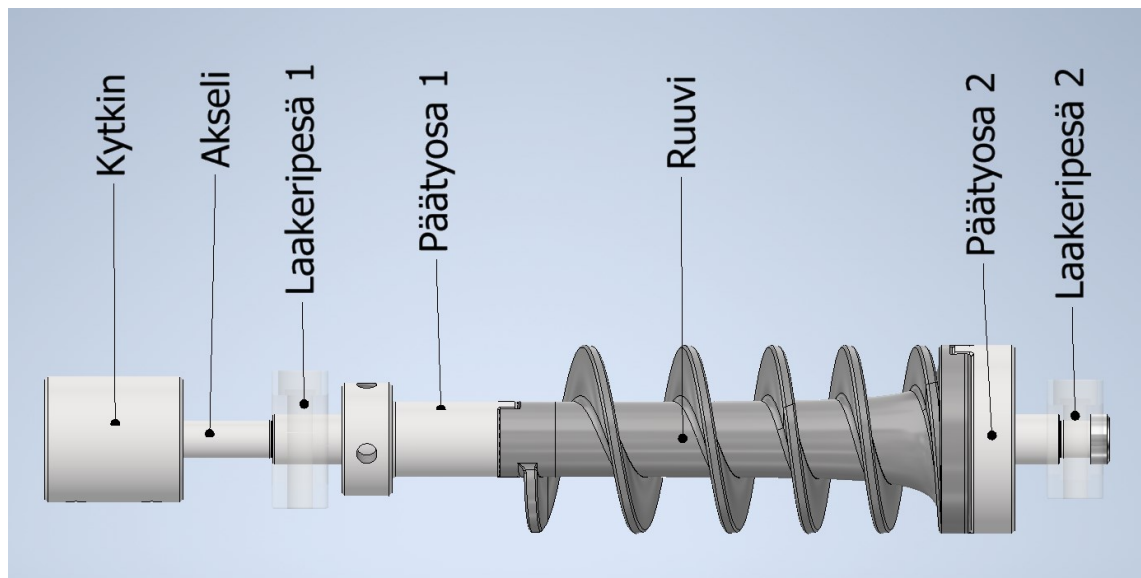
Kuva 10. Hihnakuljetinkokoonpano.

Ruuvisyöttimestä on tehty luonnosteluvaiheessa nopeasti idean testaamista varten yksinkertainen prototyyppi, jolla todettiin, että syötin voidaan valmistaa itse. Syöttimessä päätetään käyttää samanlaista moottoria, kuin hihnakuljettimessa. Erona on nyt kuitenkin, että syöttimessä moottoria käytetään ilman vaihdetta, sillä moottorin vääntö riittää hel-

posti suoravetoisenakin näin pienelle ruuville. Suoravedolla myös moottorin virran seuraaminen on tarkempaa, ja esimerkiksi mahdolliset jumitilanteet nähdään ohjelmallisesti helpommin.

Ruuvisyöttimen suunnittelu aloitetaan mallintamalla erilaisia ratkaisuja syöttöruuville. Ruuvi päätetään valmistaa 3D-tulostamalla, joten sen muoto ja rakenne voidaan suunnitella kohtalaisen vapaasti ja monimutkaisetkin yksityiskohdat ovat mahdollisia. Suunnittelussa kiinnitetään jo suoraan huomiota 3D-tulostuksen rajoituksiin ja esimerkiksi seinävahvuudet pidetään tarpeeksi suurina. Syöttimen ruuvi tulee olemaan suoraan säiliön poistoaukon kohdalla, joten syöttimen tulokapasiteetti on hallitsemaan. Tämän takia syöttimen tuloaukon kohdalla ruuvien kierteen nousu tehdään tiheämmäksi. Tuloaukon jälkeen nousu kasvaa portaattomasti. 3D-tulostus mahdollistaa myös erikoismuodon ruuvien keskiputkelle. Ruuvien halkaisijaksi valitaan 30 mm, jonka todetaan toimivan prototyypin perusteella hyvin jyvien syötössä. Kyseinen halkaisija mahdollistaa myös tarpeeksi suuret seinämävahvuudet ruuvien keskiputkelle, kun käytetään 8 mm akselia, joka menee ruuvien läpi. Ruuvien pituudeksi valikoituu noin 70 mm.

Ruuvi lukitaan akselille pajalla alumiinista valmistetuilla päätyosilla. Päätyosissa on ruuvien päissä oleviin uriin sopivat hampaat, jotka lukitsevat ruuvien akselille. Päätyosat kiinnitetään akselille pidätinruuveilla. Akselin käyttöpäähän lisätään kytkin, joka myös lukitaan paikoilleen pidätinruuveilla. Akselin kumpaakin päähän lisätään laakerit, SKF 628/8 käyttöpäähän ja toiseen päätyyn SKF 628/6. Laakerit valitaan valmiina olevista tarvikkeista ulkomittojen perusteella. Syöttimen laakereihin kohdistamat voimat ovat hyvin pieniä, joten rakennetta yksinkertaistetaan jättämällä käyttöpään laakeri vapaaksi ja lukitsemalla toinen pää. Akselin laakerien väliseksi tulee nyt noin 120 mm. Laakerit asetetaan erillisiin 3D-tulostettuihin laakeripesiin. Ruuvikokoonpano akselille on esitetty kuvassa 11.

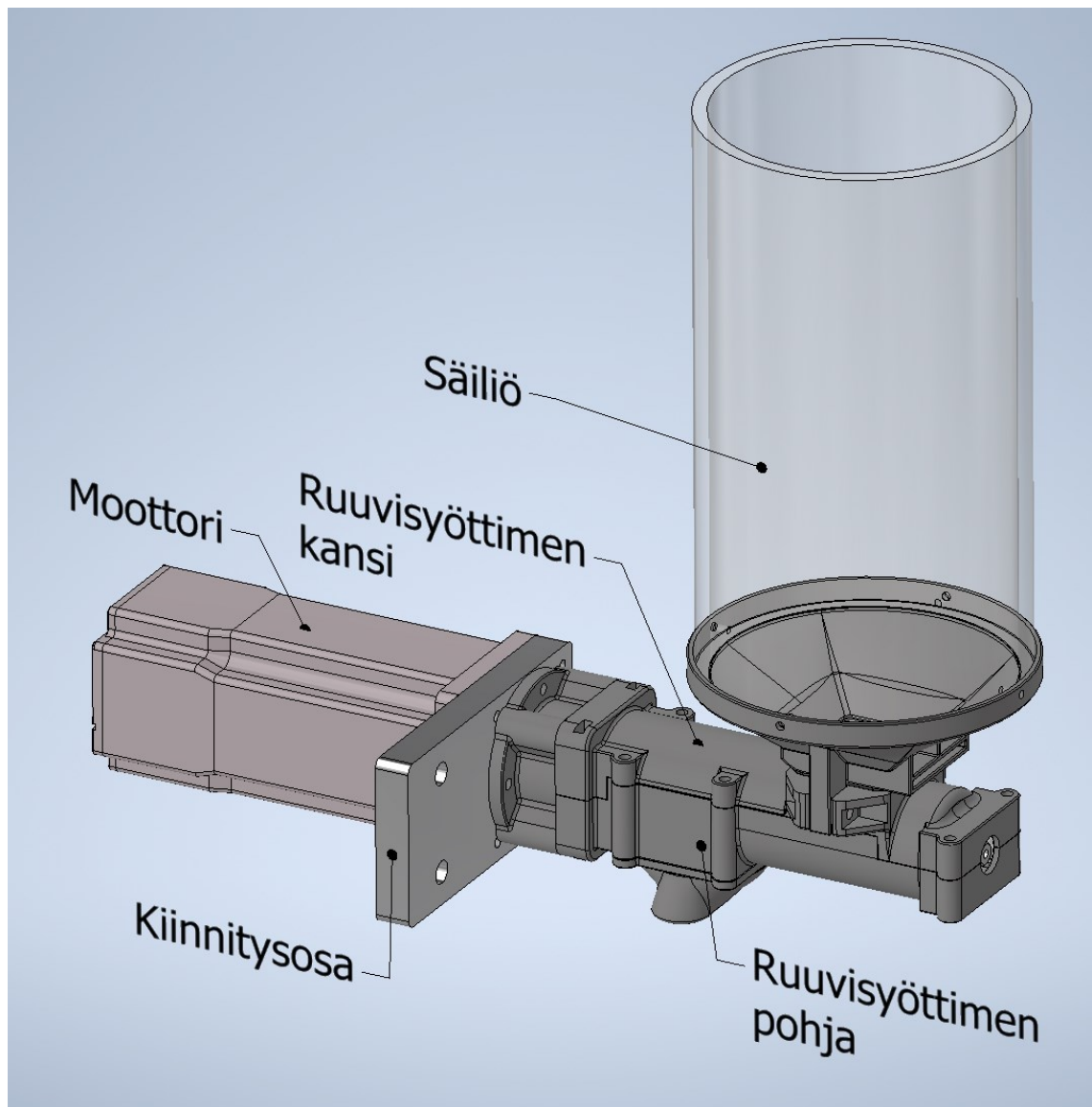


Kuva 11. Ruuvikokoonpano.

Ruuvisyöttimen suunnittelussa laaditaan erilaisia CAD-malleja, joilla haetaan järkevää ratkaisua syöttimen rungon muodolle ja kiinnityspisteille. Rungon osat päätetään 3D-tulostaa, joten suunnittelussa muotoja voidaan etsiä kohtalaisen vapaasti. Runko suunnitellaan ruuvikokoonpanon ympärille ja se koostuu kahdesta pääosasta, pohjasta ja kannesta. Pohjaosassa on tilat ja kiinnityspisteet ruuvin akselin laakeripesille. Syöttimen purkuaukko sijaitsee pohjaosassa ja siihen lisätään erillinen purkusuppilo. Rungon kansiosan kiinnitys toteutetaan siten, että kansi voidaan poistaa ilman ruuvikokoonpanon irrotusta. Kansiosassa on myös kiinnityspisteet jyväsäiliölle.

Runko kiinnitetään alumiinista pajalla valmistettuun osaan, jossa on sopivat kiinnityspisteet alumiiniprofiiliin asennusta varten. Rungon kiinnityksessä alumiiniosaan joudutaan käyttämään vielä erillistä välisosaa, sillä kokoonpanon kasaamisessa tulisi muuten ongelmia. Alumiiniosan toisella puolella on paikka syöttimen moottorille.

Rungon yläpuolelle suunnitellaan jyväsäiliö. Säiliön suppilo kiinnitetään rungon kansiosaan ja siinä on paikka myös sulkupellille. Säiliön päärunko valmistetaan ulkohalkaisijaltaan 110 mm akryyliputkesta, joka on läpinäkyvää, joten säiliön täyttöaste nähdään helposti. Sulkupellin ansiosta säiliö voidaan myös irrottaa syöttimen rungosta helposti, vaikka se olisi täynnä. Ruuvisyöttinkokoonpano on esitetty kuvassa 12.

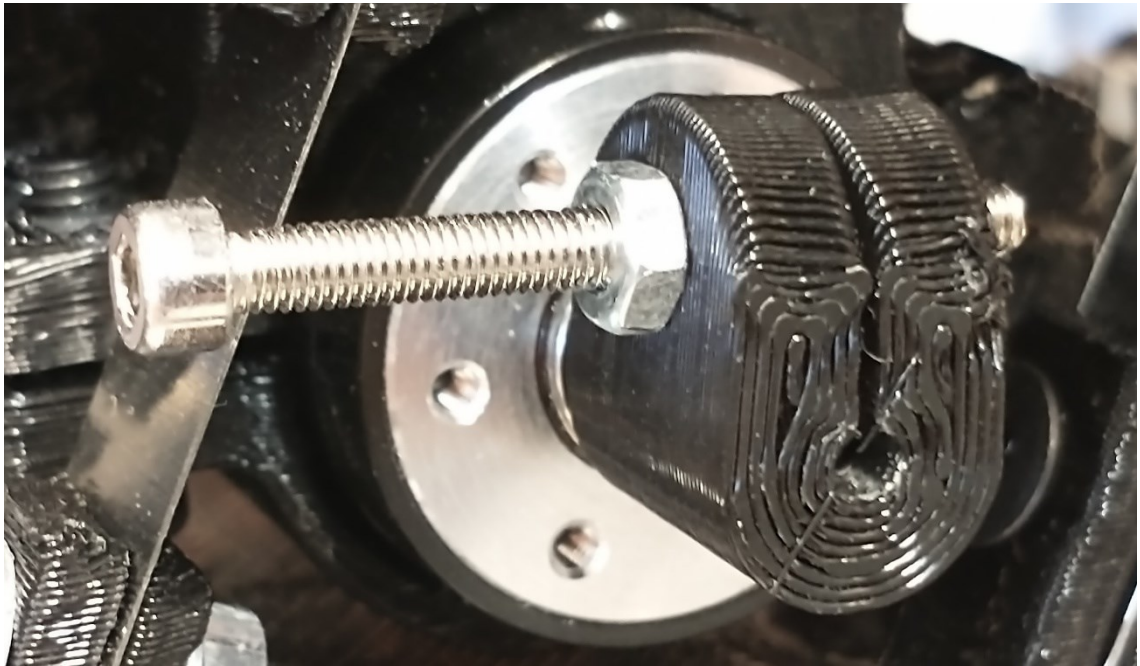


Kuva 12. Ruuvisyötinkokoonpano.

Tärykuljettimen suunnittelu on tietyiltä osin hieman vaativampi tehtävä hihna- ja ruuvi- kuljettimiin verrattuna. Tärykuljetin vaatii toimiakseen juuri oikeanlaisen dynaamisen käyttäytymisen, jota täytyisi suunnitteluvaiheessa arvioida jotenkin. Nyt suunniteltava kuljetin on kooltaan erittäin pieni ja suunnittelussa huomataan, että tärykuljettimen normaalit laskuperiaatteet toimivat hieman huonosti tässä tapauksessa.

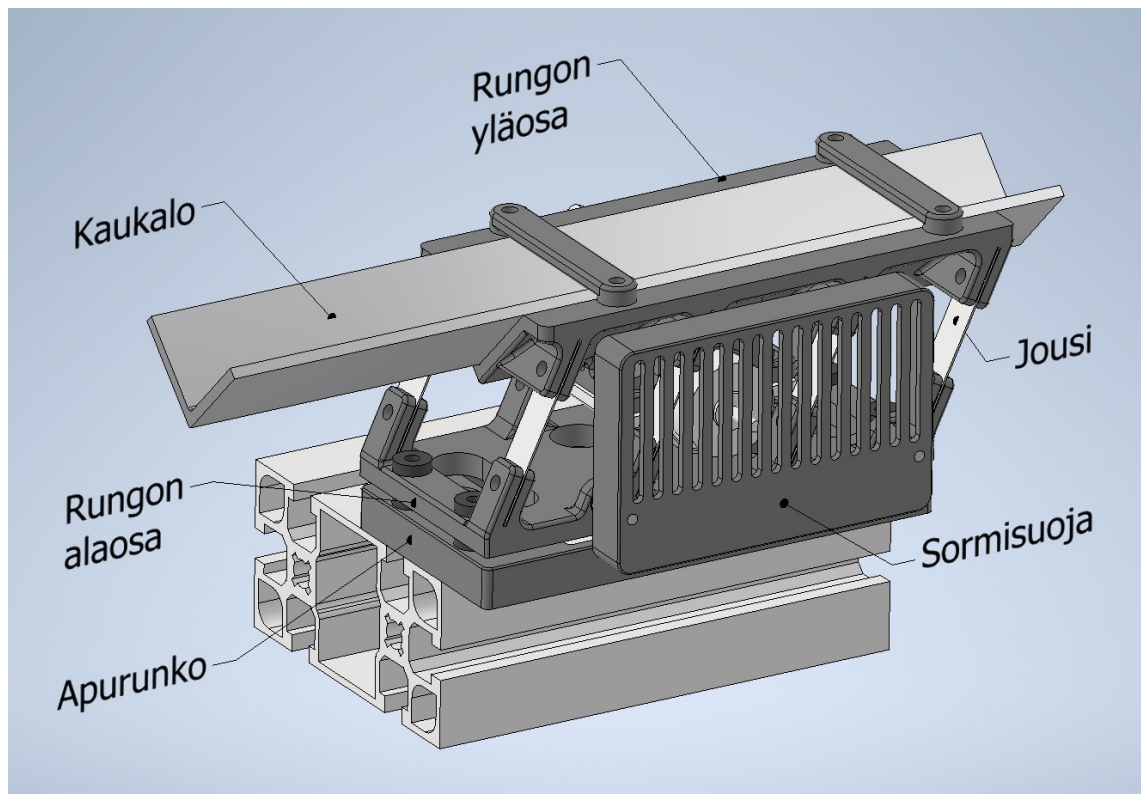
Luonnosteluvaiheessa suunniteltu prototyyppi toimii periaatteessa riittävän hyvin, mutta kuljettimen mekanismien toimintavarmuus on aivan liian huono. Tämän takia kuljetin suunnitellaan käytännössä suurilta osin uusiksi ja siinä käytetään hieman erilaista toimintaperiaatetta. Kuljettimen voimanlähteenä pidetään kuitenkin vielä edelleen sama valmiina oleva Maxonin DC-moottori, sillä tähän versioon ei vielä haluta hankkia esimer-

kiksi erityisiä sähkömagneettista toimilaitetta. Suunnittelussa pyritään minimoimaan liikkuvat osat, jolloin laitteesta tulisi toimintavarmempi ja sen huollon tarve vähentyisi. Kuljettimen kaukalon materiaaliksi valitaan 30 mm x 30 mm x 3 mm kulma-alumiiniprofiili. Kuljettimen moottorin akselille lisätään yksinkertainen kuvan 13 mukainen epäkeskopaino, jonka epäkeskisenä massana toimii 3D-tulostettuun osaan kiinnitetty M3-ruuvi. Epäkeskisen massan suuruus on säädettävissä ruuvin asentoa muuttelemalla.



Kuva 13. Tärykuljettimen epäkesko.

Kuljettimen varsinainen runko koostuu kahdesta pääosasta. Kaukalo ja moottori kiinnitetään rungon yläosaan, joka liitetään peltijousien välityksellä rungon alaosaan. Varsinaisen rungon lisäksi kuljettimeen suunnitellaan lisäksi apurunko, jolla helpotetaan kuljettimen asennusta paikoilleen. Päärunko asetetaan apurungon päälle ja väliin lisätään kumiprikoja, joilla pyritään vähentämään kuljettimen värähtelyjen siirtymistä muualle laitteistoon. Moottoriin kiinnitetty epäkesko pyörii melko vaarallisesti, joten se peitetään sormisuojaalla. Tärykuljettimen malli on esitetty kuvassa 14. Kuvassa näkyvät tumman harmaat osat valmistetaan 3D-tulostamalla.



Kuva 14. Tärykuljettimen malli.

Tärykuljettimessa on kahdeksan kappaletta peltijousia. Jousille tehdään Inventorin FEM-puolella yksinkertaisia alustavia mitoituksia, joilla pyritään arvioimaan jousien ominaisuuksien suuruusluokkaa. Tarkkoja tuloksia ei tällä mallilla kuitenkaan tavoitella, sillä uusia jousia voidaan valmistaa helposti eri paksuuksilla. Jousien paksuudeksi valitaan 0,3 mm, jolloin FEM-mallista saadaan ensimmäiseksi ominaisuuksiksi noin 500 Hz.

Kuljetin kiinnitetään kuvassa 14 näkyvän alumiiniprofiilipalkin päälle. Testiajossa kuljetin toimii hyvin valituilla jousilla. Kaukalon maksimiliikkeeksi saavutetaan täydessä resonanssissa 2–3 mm. Täydessä resonanssissa kuljetin liikuttaa jyvää aivan liian tehokkaasti, mutta moottorin pyörimisnopeutta säätämällä voidaan saavuttaa erittäin hyvin toimivia tiloja.

6.2.2 Runko

Laitteiston runko voidaan toteuttaa monilla eri tavoilla. Rungossa voidaan käyttää erilaisia putkia ja profiileita ja myös materiaalivaihtoehtoja on useita. Osat liitetään toisiinsa esimerkiksi ruuveilla tai hitsaamalla. Tässä laitteistossa pyritään kohtalaisen kevyeen ja helposti muunneltavaan runkoratkaisuun, joten runkomateriaaliksi käyvät erityisen hyvin

alumiiniprofiilit. Alumiiniprofiileille ei tarvitse tehdä erillistä pintakäsittelyä, mikä nopeuttaa valmistusta ja helpottaa rungon kokoonpanoa.

Tutkimusyksikössä käytetään Minitecin alumiiniprofiilijärjestelmiä, joten myös tähän työhön valitaan kyseiset profiilit. Rungossa käytetään Minitecin 45 mm ja 90 mm malleja ja liitokset tehdään Minitecin omilla kulmaliitososilla. Minitecillä on myös tarjolla erilaisia tarvikkeita, kuten johdonkiinnikkeitä ja päätytulppia. Lisäksi myös esimerkiksi suojalevyt voidaan kiinnittää profiileihin. Alumiiniprofiilit tilataan valmiiksi oikeisiin mittoihin leikattuina, jolloin profiilien leikkaamista ei tarvitse tehdä pajalla ja liitoksista tulee korkealaatuiset. Rungon kasaaminen onnistuu käyttämällä perustyökaluja ja laitteiston komponentit voidaan kiinnittää helposti profiilien kiinnitysuriin.

6.2.3 Kuvauskomponentit

Kuvauskomponenttien valinnan tarkastelu aloitetaan eri vaatimusten määrittelyllä. Laitteistolla kuvataan erilaisia jyvistä, jotka kulkevat hihnakuljettimen mustalla hihnalla. Hihnan nopeudeksi on määritetty kuljettimen suunnitteluvaiheessa 1 m/s. Jyvistä halutaan ottaa värikuvia, mutta kuvien tarvittavaa kokoa ei tiedetä vielä tässä vaiheessa tarkasti. Kuvista tulisi pystyä kuitenkin erottamaan jyvistä havaittavia yksityiskohtia, kuten värityksen muutoksia ja muita poikkeamia.

Kuvattavat kappaleet ovat kooltaan pieniä ja ne sijaitsevat kuvaustilanteessa lähellä kameraa, joten laitteessa käytetään 2D-kameraa. 2D-kuvia voidaan käyttää myös tässä vaiheessa helpommin konenäön opetukseen. Jyvät ovat yksittäisiä kappaleita, ja ne voivat heilahdella kuvaustilanteessa, jolloin kennon tyypiksi valitaan matriisikennon. Jyvät liikkuvat kuvaustilanteessa nopeasti, joten kameran kuvausnopeuden tulisi olla riittävän korkea, mikä saavutetaan esimerkiksi global shutter -kennolla. Kuviin ei saisi siis tulla liikkeestä johtuvia vääristymiä.

Laitteistossa päätetään käyttää testivaiheessa The Imaging Sourcen DFK Z12GX236 -kameraa, joka löytyy vapaana tutkimusyksikön välineistä. Kyseinen kamera ei ole kuitenkaan aivan ihanteellinen suunniteltavan laitteiston käyttötarkoitukseen, sillä kameran suljin on rollig-shutter-tyyppinen. Kameran muita tarvittavia ominaisuuksia voidaan tarkistaa käyttämällä seuraavia kaavoja. Ensin tarkistetaan tarvittava resoluutio kaavan (1) mukaisesti:

$$FOV = 30 \text{ mm}$$

$$S_f = 3 \text{ mm (jyvän paksuus)}$$

$$N_f = 100 \text{ P}$$

$$\rightarrow R_c = 30 \text{ mm} \cdot \frac{100\text{P}}{3 \text{ mm}} = 1000\text{P} < 1200\text{P}$$

Eli jos jyvästä halutaan erottaa paksuussuunnassa esimerkiksi 100 pikseliä, kun koko kuvan leveys on 30 mm, niin kennon resoluution tulee olla vähintään 1000 pikseliä samaan suuntaan. Käytetyssä kamerassa maksimi resoluutio on 1920x1200 pikseliä, jolloin jyvän tarkkuudeksi tulee yli 100 pikseliä paksuussuunnassa. Tässä tulee kuitenkin huomioida, että jyvät liikkuvat hihnalla, mikä huonontaa tarkkuutta. Lisäksi edellä mainittua maksimiresoluutiota tuskin tullaan käyttämään, sillä kameralla kuvataan liikkuvia kohteita, jolloin kameran kuvaustaajuuden tulisi olla mahdollisimman korkea. Korkealla kuvataajuudella ja resoluutiolla verkkokortin datansiirtonopeus muodostuu kuitenkin kameraa testatessa rajoittavaksi tekijäksi. Käytännössä korkeilla kuvausnopeuksilla kamerassa käytetään 480P -resoluutiota, jolla kuvaustaajuus saadaan korkeaksi, ja johon Ethernetin nopeus riittää. Tässä vaiheessa voidaan kuitenkin todeta, että kameralla pystytään ottamaan testivaiheeseen sopivaa kuvadataa.

Kameran kennon tyyppi on Sony IMX236LQJ, jonka formaatti on 1/2,8" ja diagonaalinen koko 6,4 mm (The Imaging Source 2021). Kennon koko s merkitään optiikan kaavojen mukaisesti negatiiviseksi (Hornberg 2017, Kappale 2). Objektiivin tarvittava suurenus lasketaan kaavasta (2):

$$\beta = -\frac{-6,4 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = 0,21333 \dots \approx 0,2$$

Kamera asennetaan testissä noin 100 mm korkeudelle hihnasta, joten kameran tarvittavan polttovälin arvioksi saadaan nyt kaavan (3) mukaisesti:

$$f' = 100 \text{ mm} \cdot \frac{0,2}{1+0,2} = 16,666 \text{ mm} \approx 17 \text{ mm}$$

Kameran polttoväli on säädettävä alueella 4,8–57,6 mm. Laskettu polttoväli osuu tälle välille, joten kamera soveltuu objektiivin puolesta tähän käyttötarkoitukseen. Koska tässä kamerassa polttoväli on säädettävä, kaavaa (4) ei tarvita tässä tapauksessa.

Kameran tiedonsiirto tapahtuu GigE-liitännän kautta, eli se liitetään keskusyksikköön Ethernet-kaapelilla. Kameran virransyöttö tapahtuu Ethernet-liittimen kautta PoE-injektorilla tai erillisellä virtalähteellä ja -kaapelilla. Lisäksi kamerassa on erillinen liipaisusignaalin liitäntä.

Kameran ensimmäisessä testausvaiheessa käytetään tutkimusyksiköstä löytynyttä Unitron DC12V 400mA -rengasvalaisinta. Kameralla otetaan pieni erä testikuvia ja todetaan, että valaisin on käyttötarkoitukseen aivan liian pienitehoinen. Laitteiston varsinaiseksi valasimeksi hankitaan Latab SAW4 2230 B190 -valaisin, jota ohjataan Latab PAD2 4136/3D -LED-ohjaimella.

Valittu valaisin on kaksiosainen viivavalo, jolloin valo saadaan kohdistettua hihnalla kulkevien kappaleiden molemmille puolille. Valot ovat pituudeltaan 230 mm, minkä ansiosta samalla valaisimella on mahdollista valaista useampaa kameraa. Valon väri on valkoinen, joka soveltuu värivalokuvien ottamiseen. Latabin valaisin on huomattavasti tehokkaampi, kuin testauksessa käytetty Unitronin valaisin, joten kameran suljinaikaa voidaan säätää paljon lyhyemmäksi.

Valaisimen ohjainyksikkö toimii 24 VDC käyttöjännitteellä ja se ottaa maksimissaan 2 A virtaa. Ohjainyksikköä ohjataan Ethernetin välityksellä. Valaisimen tehoa voidaan säätää normaalisti välillä 0–100 % ja pulssikäytössä välillä 0–200 %, jossa 200 % teholla valo pysyy päällä 5 s kerrallaan. Valaisinta pystytään ohjaamaan myös liipaisusignaaliilla, joka kulkee ohjausprotokollan tai erillisen signaaliliittimen kautta.

6.2.4 Sähkö- ja automaatiojärjestelmä

Laitteiston sähkö- ja automaatiojärjestelmän suunnittelu aloitetaan määrittelemällä alustavasti halutut ominaisuudet ja muut komponentteihin liittyvät vaatimukset. Laitteistosta halutaan jo tässä vaiheessa tehdä teollisuuden järjestelmien kaltainen kokonaisuus, joten järjestelmän ohjaus päätetään toteuttaa käyttämällä teollisuuteen sopivia ohjelmoitavia logiikoita ja IPC:tä. Laitteistossa käytetään Beckhoff Automationin komponentteja, sillä Beckhoffin järjestelmiä on käytetty tutkimusyksikön muissa projekteissa. Beckhoffin komponentteihin ja ohjelmistoihin liittyen löytyy siis asiantuntemusta ja apua yksikön sisäلت. Myös laitteiston kuljettimiin tarvittavat moottorit hankitaan Beckhoffilta.

Laitteistoon tarvittavat automaatiokomponentit hankitaan Beckhoffilta pakettina, johon kuuluvat myös lisäksi hihna- ja ruuvikuljettimen moottorit. Moottorien mitoitus määrittää käytetyt moottorinohjaimet. Järjestelmää käytetään konenäkösovelluksiin, joten keskusyksiköltä vaaditaan korkeaa suorituskkyä. Laitteistosta halutaan kuitenkin pienikokoinen, mikä rajoittaa IPC:n kokoa. Beckhoffin asiantuntija tekee komponenttien valinnat määriteltujen vaatimusten mukaan. Pakettiin kuuluvat taulukon 2 mukaiset komponentit (pois lukien moottorit).

Taulukko 2. Beckhoff-järjestelmän komponentit

Komponentti	Kuvaus	Määrä (kpl)
C6030	Kompakti IPC, Intel® Core™ i7 -suoritin	1
EK1100	EtherCAT-kytkin	1
EL6070-0033	Lisenssiterminaali	1
EL9222-5500	Ylivirtasuojia, 24 V, 2 kanavaa, yhteensä max. 10 A	2
EL1008	8-kanavainen digitaalinen sisääntuloterminaali, 24 V	1
EL2008	8-kanavainen digitaalinen ulostuloterminaali, 24 V	1
EL7221-9014	1-kanavainen servomoottorihjain, 48 V, 8 A	2
EL7332	2-kanavainen DC-moottorihjain, 24 V, 1 A	1
Balluff BAE0002, BAE PS-XA-1W-24- 100-004	Virtalähde, 24 VDC, 10 A	2

Balluffin virtalähteillä toteutetaan järjestelmän 24 VDC virransyöttö. Virransyöttö jaetaan kahteen osaan, joissa ensimmäinen Balluff antaa virtaa järjestelmän IPC:lle, logiikoille, LED-ohjaimelle ja muille 24V komponenteille, ja toinen Balluff taas antaa virtaa moottorien ohjaimille. Virransyöttö kulkee ylivirtasuojien kautta. Laitteiston kameran virransyöttö toteutetaan Moxa INJ-24 PoE-injektorilla ja Mean Well NDR-120-48-virtalähteellä. PoE-injektori siis syöttää kameralle 48 VDC Ethernet-kaapelin kautta.

Laitteiston sähköasennukset tehdään sähköasentajan kanssa, sillä sähkötöihin vaaditaan pätevyys. Asennuksiin ja tarvittavien komponenttien valintaan liittyvää tietoa löytyy esimerkiksi Keinäsen (2009) kirjasta. Sähköjärjestelmään lisätään syötön pääkytkin ja johdonsuojakatkaisija. Johdonsuojalla lisätään laitteen sähköjärjestelmän turvallisuutta, minkä lisäksi mahdollinen vikatilanne ei laukaise pistorasiakeskuksen sulaketta. Valinnassa tulee huomioida, että nimellisvirran pitää olla pienempi, kuin pistorasiakeskuksessa olevan johdonsuojan raja, mikä on yleensä 16 A. Järjestelmän virtalähteiden yhteenlaskettu syöttövirta on 7,2 A. Pääkytkimenä käytetään Eaton Electricin-katkaisijaa, jonka

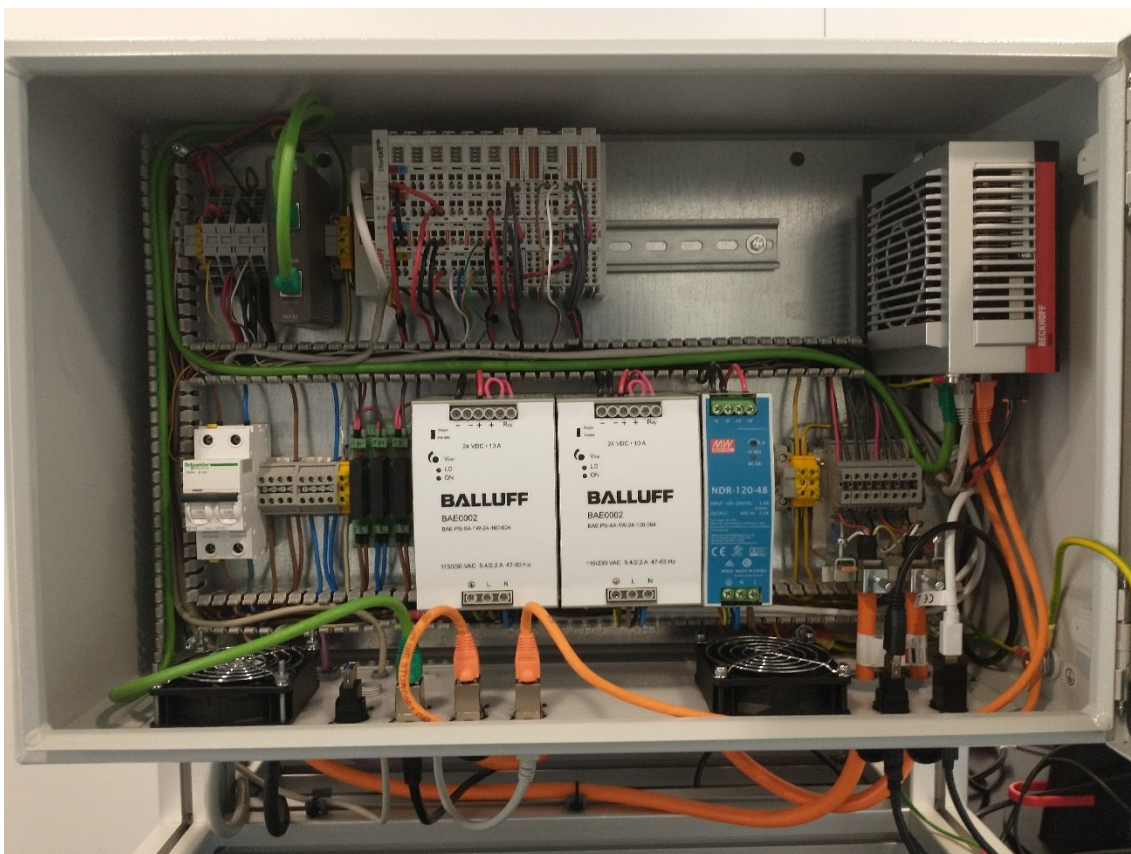
nimellisvirta on 20 A. Johdonsuojan nimellisvirraksi määritetään 10 A ja laukaisukäyrän muodoksi B, ja se valitaan Schneider Electric IC60H-sarjasta.

Nyt automaatiojärjestelmän tärkeimmät komponentit ovat tiedossa ja kytkennästä on tehty alustavia hahmotelmia, joten seuraavaksi voidaan valita laitteistoon sopiva ohjauskeskus. Komponenttien tulee mahtua väljästi ja tarkoituksenmukaisesti ohjauskeskuksen sisään, minkä lisäksi sijoittelussa tulee huomioida asennukseen liittyvät muut osat, kuten johdotuskourut ja riviliittimet. Komponentit päätetään asentaa metalliseen keskuskaappiin, joka valitaan Rittalin AE-sarjasta. Keskuksen kooksi valitaan 600x380x210 mm. Keskuksen ilmanvaihto toteutetaan kahdella 80 mm kotelotuulettimella, joista toinen puhalttaa ilmaa sisälle koteloon ja toinen ulos kotelosta. Tuulettimet asennetaan keskuksen laippalevyyn. Sisään puhaltavalle tuulettimelle asennetaan pölysuodatin ja se valitaan hieman tehokkaammaksi, kuin ulospuhaltava tuuletin. Tällöin keskuksen sisällä on pieni ylipaine, jolla vähennetään pölyn kertymistä keskuksen sisälle.

Järjestelmän komponentit asennetaan 35 mm DIN-kiskoihin, jotka kiinnitetään ohjauskeskuksen pohjalevyyn. Lämpenevien komponenttien, kuten IPC:n, virtalähteiden ja moottorinohjaimien asennuksissa tulee huomioida riittävät jäähdytysolosuhteet, jotka ilmoitetaan komponenttien datalehdissä. Järjestelmän johtimet ja kaapelit sijoitetaan johdotuskouruihin, jolloin keskuksen yleisilme pysyy siistinä, eivätkä johdot haittaa ilmavirtaa. Johdinten päihin asennetaan asianmukaiset holkit tai abiko-liittimet. Keskuksen ulkopuolelle menevät johdot vedetään keskuksen laippalevyyn asennettujen vedonpoistoholkkien tai liitinläpivientien kautta.

Sähköjärjestelmän testivaiheessa huomataan, että virtalähteet aiheuttavat virtapiikin, joka laukaisee johdonsuojan, kun järjestelmä laitetaan päälle pääkytkimestä. Tämän takia moottorien ja PoE-injektorin virtalähteiden syötölle lisätään releet, joita ohjataan virtalähteistä lähtevillä ”valmis”-signaaleilla. Tällöin virtalähteet käynnistyvät yksitellen, eikä pääsyötölle synny liian suurta virtapiikkiä.

Ohjauskeskus on esitetty kuvassa 15. Johdotuskouruissa ei ole vielä kansia eikä johtimissa lopullisia merkintöjä. Kuvasta nähdään hyvin komponenttien sijoittelu; virtalähteet ovat keskuksen keskellä, logiikkakortit yläosassa, IPC oikealla ja virranjako vasemmalla. Vihreä kaapeli on kameran PoE-injektorin kautta kulkeva Ethernet-kaapeli. Oransseja kaapeleita ovat paksummat moottorikaapelit ja ohuimmat LED-ohjaimelle menevä ja IPC:lle tuleva Ethernet-kaapeli.



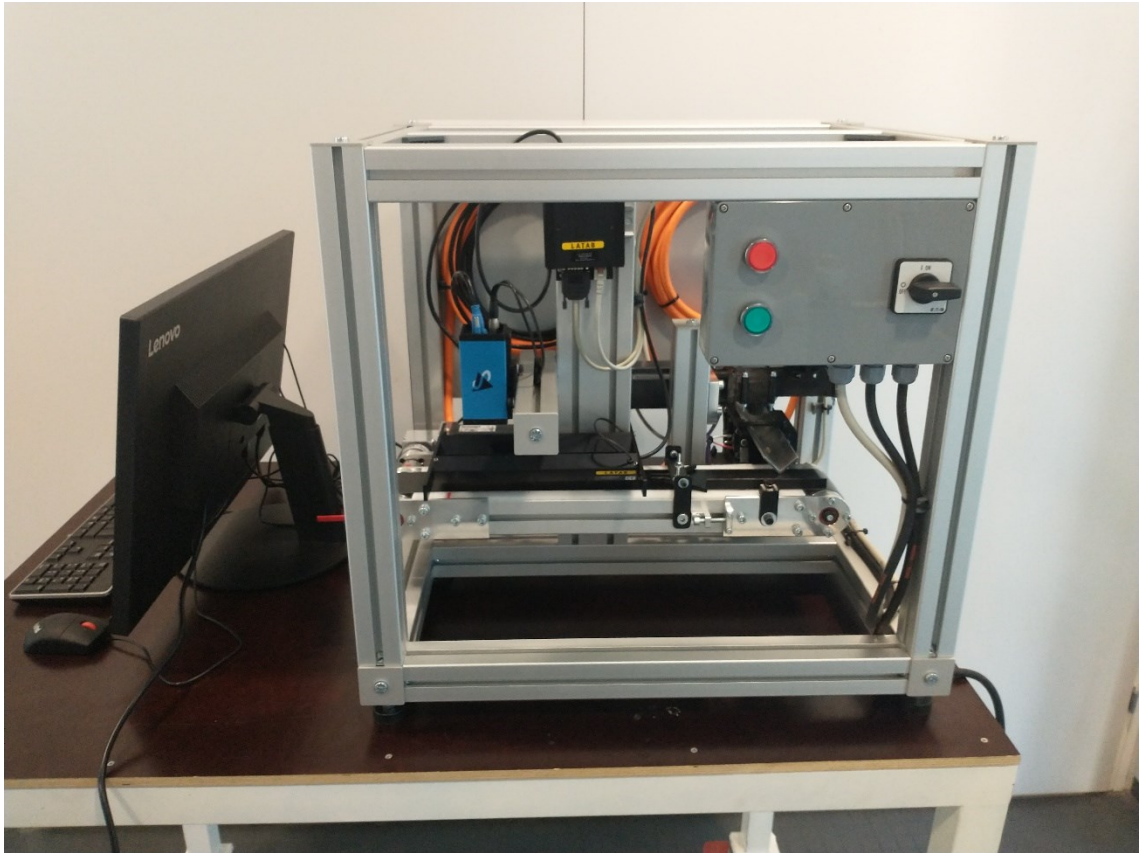
Kuva 15. Järjestelmän ohjauskeskus.

Kuvasta 16 nähdään laitteistoon asennettu pienempi ohjauskotelo, johon on sijoitettu pääkytkin, sekä ohjaukseen käytetyt merkkivaloilla varustetut kytkimet. Kuvasta nähdään myös laitteiston kamera (sininen laite), sekä LED-valaisin ja -ohjain (musta laite keltaisella merkinnällä). Kuvassa kiepillä olevat oranssit kaapelit ovat moottorikaapeleita, joita ei haluta vielä tässä vaiheessa katkaista lyhyemmiksi.

6.3 Kokoonpano

Nyt laitteiston kaikki tärkeimmät osakomponentit ovat suunniteltuina ja valittuina. Kokoonpanosta tehdään CAD-malli, jossa eri osat voidaan asettaa oikeille paikoilleen toisiinsa nähden. Runko mallinnetaan osien ympärille ja sen koko määräytyy hyvin pitkälle valitun ohjauskeskuksen mukaan. Rungon pohjaosaan lisätään tärinää vaimentavat kumijalat. Osakomponentit sijoitellaan kokoonpanoon kohtalaisen väljästi, jotta laitteistoon voidaan tehdä tarvittaessa helposti säätöjä ja muutoksia. Myös uusien osien lisääminen myöhemmissä vaiheissa on siten mahdollista. Kokoonpanon suunnittelussa kiinnitetään huomiota komponenttien helppoon asennukseen, eli esimerkiksi säädöt pitäisi pystyä tekemään perustyökaluilla ilman muiden komponenttien irrotusta. Kaapelit kiinnitetään

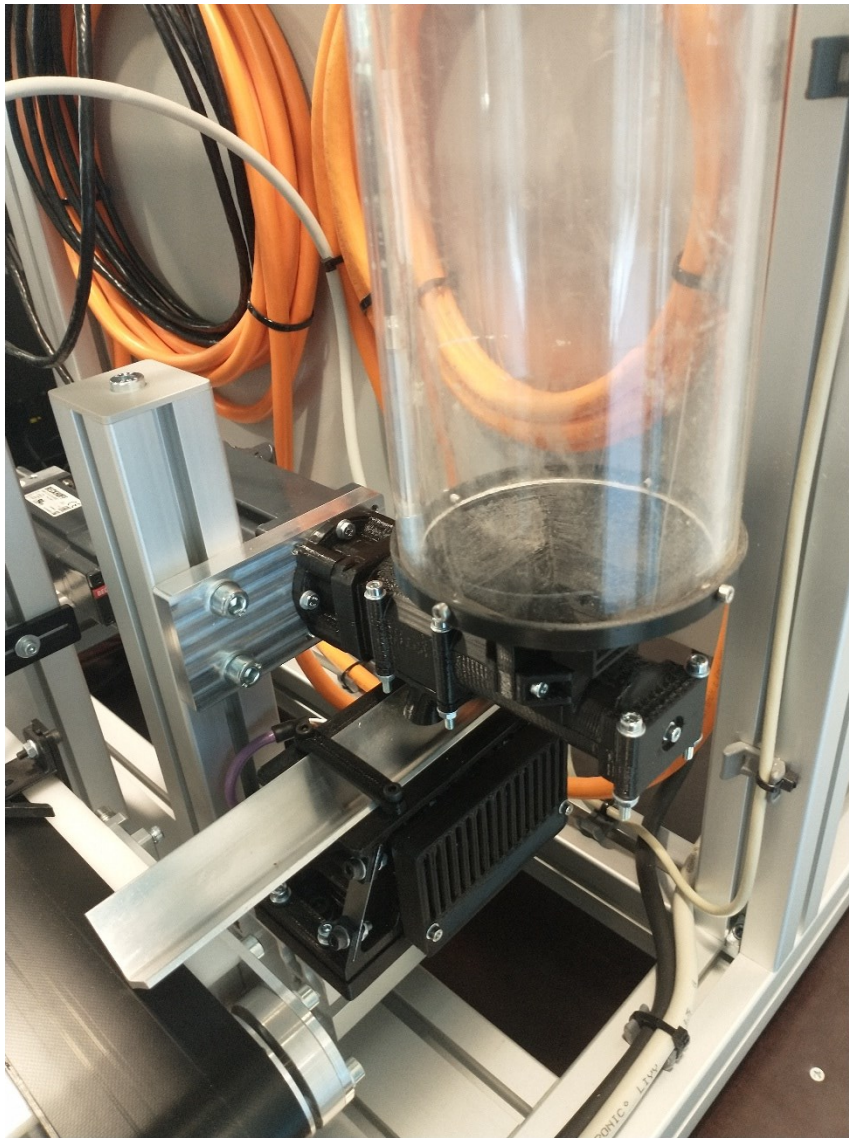
nippusidekiinnikkeillä rungon alumiiniprofiileihin. Laitteiston kokoonpano on esitetty kuvassa 16. Tässä vaiheessa laitteistosta puuttuu vielä lopulliset suojakuoret, jotka voidaan asentaa myöhemmin runkoprofiileihin.



Kuva 16. Laitteiston kokoonpano.

Laitteistoon liitetään testivaiheessa näyttö, näppäimistö ja hiiri. Laitetta voidaan kuitenkin käyttää myös esimerkiksi etäyhteyden kautta, jolloin laitteistoon ei tarvitse liittää lisälaitteita. Kuvassa laitteen vasemmalle puolelle hihnakuljettimen kohdalle asetetaan laitetta käytettäessä astia, johon kuvattavat jyvät putoavat.

Kuvasta 17 nähdään tarkemmin laitteiston säiliö ja ruuvisyötin, sekä tärykuljetin. Säiliö on kiinnitetty suoraan ruuvisyöttimen runkoon. Ruuvisyötin ja tärykuljetin ovat kiinnitettynä samaan runkopalkkiin, jota liikuttamalla syötinkokonaisuuden asentoa voidaan säätää helposti.



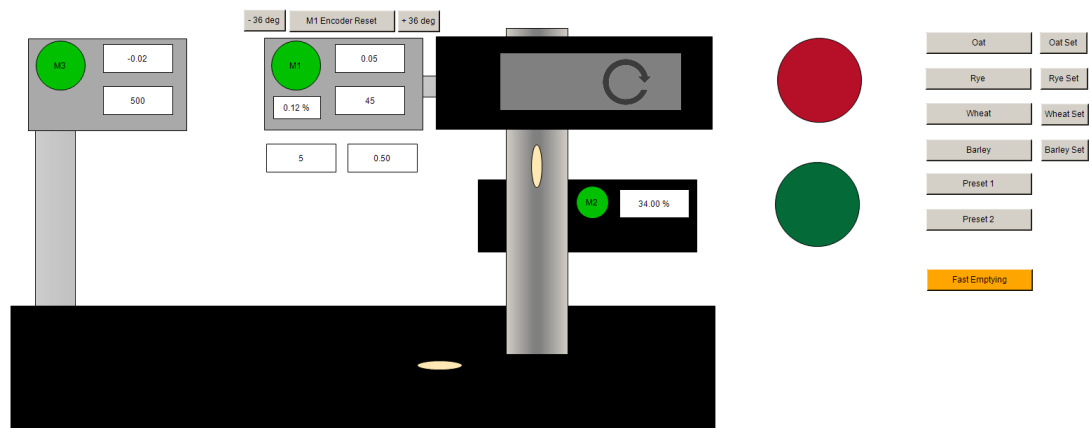
Kuva 17. Laitteiston säiliö, ruuvisyötin ja tärykuljetin.

6.4 Ohjausohjelma

Laitteiston ohjaus toteutetaan Beckhoffin järjestelmällä, jonka ohjelmoimiseen ja konfigurointiin käytetään TwinCAT 3 -ohjelmistoa. TwinCAT mahdollistaa Windows-tietokoneen käyttämisen käytännössä reaaliaikaisena logiikkaohjaimena. TwinCAT on monipuolinen ohjelmointiympäristö, joka tukee monia ohjelmointikieliä ja yleisimpiä logiikoiden ohjelmointitapoja. Laitteistossa käytetään Beckhoffin IPC:tä, jossa on tehdasasennettuna Windows 10 Enterprise-käyttöjärjestelmä. IPC on suorituskyvyltään tehokas ja ohjelmointi voidaan tehdä suoraan IPC:tä käyttäen ilman erillisiä tietokoneita.

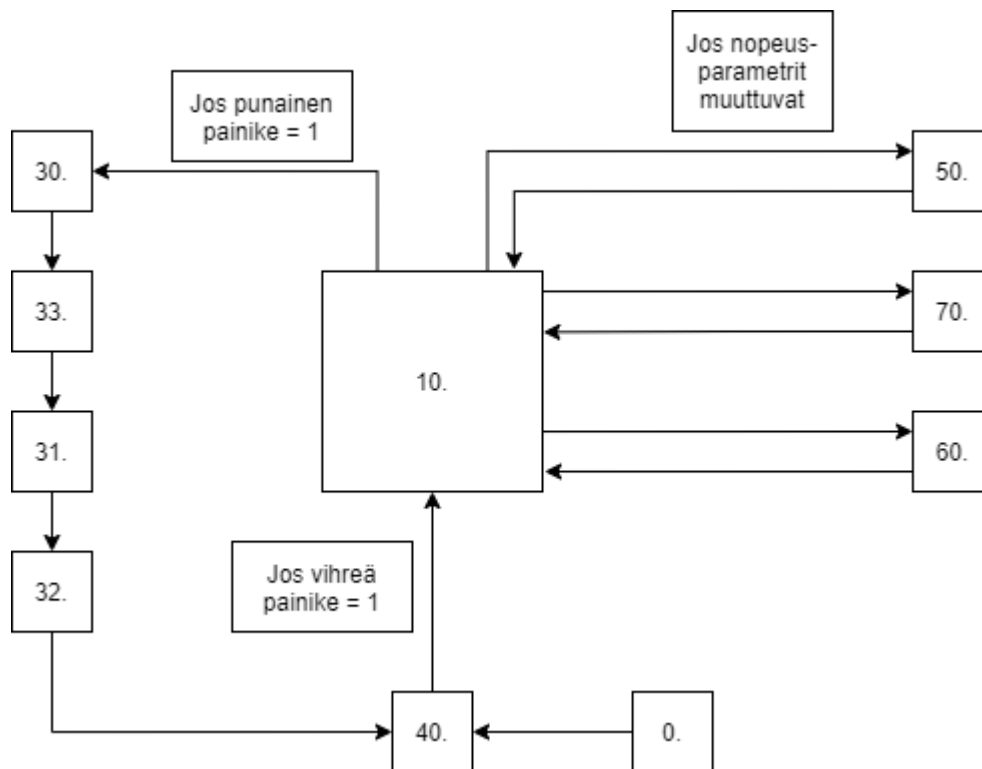
Ohjelmointi aloitetaan hahmottelemalla laitteiston perustoimintoja. Laitteistossa on kolme käyttävää moottoria, eli TwinCATin puolella ohjelmaan tulee siten kolme akselia. Laitteistoon asennetaan punainen ja vihreä merkkivalolla varustettu teollisuuspainike. Painikkeet kytketään EL1008-sisääntulokorttiin ja merkkivalot EL2008-ulostulokorttiin. I/O-kortit linkittyvät TwinCATin puolella oleviin kanavien muuttujiin.

Ohjelman perustoimintaa lähdetään kuvaamaan suoraan laitteiston käyttöliittymään, joka luodaan TwinCATin omilla työkaluilla. Käyttöliittymästä tehdään laitteiston fyysistä rakennetta kuvaavan kaavion näköinen, eli siihen lisätään kuljettimia ja moottoreita, sekä painikkeita kuvaavat yksinkertaiset symbolit. Lisäksi käyttöliittymään lisätään muita käyttöön ja säätöön liittyviä painikkeita, sekä tekstikentät halutuille säätöparametreille, kuten moottorien pyörimisnopeuksille. Valmis käyttöliittymä on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Laitteiston käyttöliittymä.

Ohjausohjelma kirjoitetaan ST-kielellä. Laitteiston toiminnasta muodostetaan yksinkertainen tilakone, jolla kuljettimien moottoreita ohjataan. Tilakaavio on esitetty kuvassa 19 ja tilakaavion tilojen selitteet taulukossa 3.



Kuva 19. Ohjelman tilakaavio.

Taulukko 3. Tilakaavion tilojen selitteet.

Tila	Selite
0.	Muuttujien ja moottorien alustus
40.	Pysähtynyt tila. Käynnistyssignaalin (vihreä painike) odotus
10.	Käynnissä tila. Säästöparametrien tarkkailu
50.	1. akselin (ruuvisyötin) nopeuden asetus
60.	2. akselin (tärykuljetin) nopeuden asetus
70.	3. akselin (hihnakuljetin) nopeuden asetus
30.	Moottorien pysäytyksen aloitustila
31.	1. akselin (ruuvisyötin) nopeuden asetus nolnaan
32.	2. akselin (tärykuljetin) nopeuden asetus nolnaan
33.	3. akselin (hihnakuljetin) nopeuden asetus nolnaan

Ohjelman käynnistyksessä alkutilana on 0. tila, jossa suoritetaan tarvittavat muuttujien alustukset, sekä moottorien nollaus ja aktivointi. Kun moottorien aktivointi on valmis, ohjelma siirtyy tilaan 40. Tila 40 on järjestelmän pysäytystila, jossa moottorien nopeus on säädetty nolnaan. Tässä tilassa kumpikaan merkkivalo ei pala. Kun 40 tilassa painetaan vihreää painiketta, siirtyy ohjelma tilaan 10. Tilassa 10 vihreä merkkivalo palaa ja oh-

ohjelma lukee käyttöliittymään syötettyjä parametreja. Jos parametreihin tehdään muutoksia, siirtyy ohjelma tilaan 50, 60 tai 70, joissa tehdään moottorien säätö. Jos tilassa 10 painetaan punaista painiketta, siirtyy ohjelma tilaan 30, joka on moottorien pysäytyksen alkutila. Tilassa 30 vihreä merkkivalo sammutetaan ja punainen sytytetään, jonka jälkeen ohjelma aloittaa moottorien nopeuksien asetuksen nollaan tiloissa 33, 31 ja 32. Moottorien pysäytys kestää pienen hetken, minkä takia ne pysäytetään vaarallisuuden mukaan kaavion mukaisessa järjestyksessä. Kun viimeinen moottori on pysäytetty, siirtyy ohjelma tilaan 40.

7 TESTAUS, TULOKSET JA KEHITYSKOhteet

Laitteiston komponentteja testattiin toteutuksen eri vaiheissa, esimerkiksi kuljettimien toimintaa voitiin testata ennen niiden kiinnitystä paikoilleen. Hihnakuljetinta ja ruuvisyötintä pyöritettiin ennen moottorien kiinnitystä porakoneella, jolloin nähtiin nopeasti, toimivatko ne halutulla tavalla. Hihnakuljetinta testatessa kiinnitettiin huomiota kuljettimen vastustaviin voimiin ja todettiin, että kuljetin toimi riittävän hyvin, sillä sitä pystyi pyörittämään sormin akselikytkimeltä. Ruuvisyötintä pystyi pyörittämään vaivattomasti sormin suoraan akselilta jopa sen ollessa täynnä jyviä. Ruuvisyötin ei myöskään jumitunut testivaiheessa. Tärykuljetinta testattiin irrallaan liittämällä sen käyttömoottori pöytävirtalähteeseen. Testivaiheessa löydettiin moottorin pyörimisalue, jolla kuljetin alkoi resonoimaan juuri oikealla tavalla. Kaukaloon lisättiin jyviä, joiden todettiin liikkuvan hyvin täryn vaikutuksesta.

Kamera testattiin etukäteen ennen asennusta liittämällä se pöytätietokoneeseen. Samalla tutustuttiin alustavasti eri ohjelmistoihin, joita kameran kanssa voidaan käyttää. Kameran virransyöttö toteutettiin tässä vaiheessa erillisellä kameran virtalähteellä ja -johdolla, sillä sopivaa pöytämallista PoE-injektoria ei ollut käytettävissä. Valaisin testattiin myös etukäteen pöytävirtalähteen avulla.

Laitteiston muita komponentteja, kuten logiikkakortteja, katkaisimia ja virtalähteitä testattiin mahdollisuuksien mukaan kokoonpanon aikana. Sähköasennusten aikana virtalähteistä katsottiin, että ne toimivat ennen muiden komponenttien kytkemistä tasajänniteliittimiin. Logiikkakorttien toimintaa testattiin jo ennen varsinaisen ohjelman kirjoitusta, esimerkiksi painonappien toiminta nähtiin I/O-korttien indikaattorivaloista ja moottoreita voitiin ajaa ”manuaalisesti” antamalla käskyjä suoraan moottorinohjaimelle.

Ohjelman kirjoitusvaiheessa testattiin ja tutustuttiin logiikkakomponenttien ominaisuuksiin ja toimintoihin. Käyttöliittymän toiminta suunniteltiin siten, että yksittäisiä komponentteja oli helppo testata yksittäin, esimerkiksi ruuvisyötintä voitiin ajaa ilman, että muut kuljettimet ovat toiminnassa. Kun kaikkien yksittäisten komponenttien toiminta oli tarkastettu, voitiin aloittaa laitteiston varsinaisen toiminnan tarkistus ja säätäminen. Eri jyvälajikkeet käyttäytyivät hieman eri tavoilla, joten jokaiselle jyvälajikkeelle jouduttiin etsimään juuri sopivat kuljettimien parametrit, joilla kuvaus tapahtuu halutulla tavalla.

Käyttöliittymässä parametrit voitiin tallentaa helposti suoraan muistiin napin painalluksella. Laitteiston valaisinta on mahdollista säätää ohjelmallisesti, mutta vielä tässä vaiheessa valaisin pidettiin kokoaikaisesti 100 % teholla. Kun valaisin oli asennettu paikoilleen ja toimintaan, voitiin aloittaa kameran säätäminen ja testaus. Kameralle haettiin alustavia parametreja, joilla ensimmäisten testikuvien ottaminen voitiin aloittaa. Tärkeimpiä säätöjä olivat esimerkiksi kameran tarkennus, suurennus, herkkyys ja valotusaika.

Jyvien kuvausjärjestelmän prototyyppi saatiin valmiiksi ja toimintakuntoon ensimmäisien testikuvasarjojen keräystä varten. Laitteiston vaatimukset ja suurin osa toiveista pystyttiin toteuttamaan. Laitteisto on kohtalaisen turvallinen käyttää ja turvallisuutta lisätään myöhemmin asentamalla runkoon suojalevyt. Ohjauskeskus on varustettu lukolla, joten perehdyttämättömät henkilöt eivät pääse sinne käsiksi kovin helposti. Laitteiston kokoonpanosta ja asennuksista yleensä onnistuttiin tekemään toimiva ja yleisilmeeltään siisti kokonaisuus, jossa käytettiin suurimmaksi osaksi teollisuusympäristöön tarkoitettuja komponentteja.

Laitteisto on rakenteeltaan helposti muunneltavissa, ja siihen on helppo lisätä uusia ja erilaisia komponentteja väljän sijoittelun ansiosta, esimerkiksi lajittelulaitteelle on hyvin tilaa hihnakuljettimen kohdalla. Hihnakuljettimen yläpuolella on tilaa kahdelle tai jopa kolmelle kameralle. Laitteisto on myös ulkomitoiltaan kohtalaisen kompakti, 800 mm x 800 mm x 800 mm. Laitteistoon suunnitellut kuljettimet toimivat tehtävässään erittäin hyvin.

Ruuvisyöttimen pyörimisnopeus on normaalikäytössä noin 40 rpm, mutta sen todettiin toimivan hyvin vielä 200 rpm nopeuksilla. Rajoittavaksi tekijäksi tuli syöttimen poistosuppilon koko. Myös tärykuljettimen suorituskyky riittää erittäin hyvin sovellukseen. Sen resonanssikohta löydettiin noin 37 % moottorin pyörimisnopeudella. Pyörimisnopeuden hienosäädöllä kuljettimen syöttönopeutta voidaan myös säätää tarkasti. Hihnakuljettimen nopeutta voidaan säätää välillä 0–1500 mm/s mikä riittää helposti kuvaussovelluksiin, ja nopeutta voidaan saada ehkä vieläkin korkeammalle moottoriparametrien hienosäädöillä. Suunnitellut kuljettimet ovat käyntiääneltään melko hiljaisia, hihnakuljetin on suuremmilla nopeuksilla kaikista äänekkäin komponentti järjestelmässä. Kuljettimet eivät myöskään vaadi kovin paljoa tehoa moottoreilta ja moottorienohjaimilta. Kuljettimet toimivat ilman ongelmia kaikilla halutuilla jyvälajikkeilla, minkä lisäksi ne ovat käytännössä täysin itsestään tyhjeneviä.

Järjestelmän peruskäyttö on yksinkertaista. Laitteiston säiliö täytetään kuvattavilla jyvänäytteillä ja laite käynnistetään päävirtakytkimestä, jolloin järjestelmän IPC ja muut komponentit käynnistyvät noin puolessa minuutissa. Tässä vaiheessa käyttöliittymän ja kameran hallintaohjelmiston käynnistys tehdään vielä manuaalisesti, mutta ne on mahdollista automatisoida. Beckhoffin käyttöliittymässä on kuljettimien moottoreille säädöt, joille asetetut vakioarvot voidaan noutaa eri lajikkeille käyttöliittymässä olevien painikkeiden avulla. Uusien lajikekohtaisten arvojen asetus onnistuu myös käyttöliittymän painikkeilla. Laitteistossa on kaksi I/O-kortteihin liitettyä fyysistä merkkivalolla varustettua painiketta, joiden virtuaaliset vastineet löytyvät myös käyttöliittymästä. Kun TwinCAT-ohjausohjelma on käynnistetty, voidaan kuljettimille asettaa nopeuksia ja moottorit lähtevät pyörimään vihreästä painikkeesta. Moottorit pysähtyvät punaisella painikkeella. Kameran hallinta tapahtui tässä vaiheessa sen omalla ohjelmistolla. Kameran säätöparametrit voidaan ladata tiedostosta ja kamera lähtee ohjelmiston aloituspainiketta painamalla kuvamaan videota. Toinen vaihtoehto on käyttää erillistä tutkimusyksikössä ohjelmoitua python-ohjelmaa, joka kaappaa kuvia suoraan kameran videosyötteestä. Tämä ohjelma ei kuulu kuitenkaan työn varsinaiseen sisältöön, joten sen toimintaan ei perehdytä tarkemmin.

Laitteisto kykenee käsittelemään jyviä siten, että ne ovat hihnakuljettimella toisistaan erillään ja kuvaus onnistuu yksitellen. Laitteiston kuvausnopeus on säädettävissä välillä 5–8 kuvaa sekunnissa ja myöhemmissä vaiheissa moottorien parametreja säätämällä ja eri kameroita käytettäessä päästään todennäköisesti korkeampiin kuvausnopeuksiin. Tällä nopeudella laite ehtii ottaa puolessa tunnissa kuvia noin litrasta jyviä, josta saadaan noin 10000 kuvaa. Korkeampia kuvaustaajuuksia käytettäessä laite ehtii yleensä ottaa samasta jyvistä 2–3 kuvaa. Testivaiheessa yhden kuvan koko oli 640x480P, joka vie noin 1 Mt tilaa. Kameran suljinaika oli 1/4000 s, mitä käytettäessä kuvat onnistuivat ilman vääristymiä. Testikuvia otettiin kaurasta, vehnästä, rukiista ja ohrasta. Jokaisesta lajikkeesta kerättiin noin 5000 kuvaa. Testikuvasarjasta poimittuja esimerkkikuvia on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Järjestelmällä otettuja kuvia.

Testikuvasarja otettiin käyttämällä edellä mainittua erillistä pythonilla kirjoitettua ohjelmaa, joka poimi kuvia suoraan kameran videosyötteestä. Ohjelma suoritti myös taustanpoiston. Kuvista nähdään hyvin jyvien erilaiset piirteet, kuten muotoon ja väriin liittyvät yksityiskohdat. Kuvat ovat värisävyltään melko tummia, mutta yksityiskohdat erottuvat kuitenkin hyvin. Kuvien valotusta voitiin lisätä hidastamalla kuvausnopeutta, jolloin suljinaikaa saatiin nostettua. Otetut kuvat olivat kuitenkin jo tässä vaiheessa laadultaan tarpeeksi hyvälaatuisia ja niitä voitiin verrata kuviin, joita muissa aiheeseen liittyvissä uudemmissa tutkimuksissa on otettu. Esimerkiksi Sabancin ym. (2017) tutkimuksessa yhdessä 15 megapikselin kuvassa on 100 jyvää, jolloin yhden jyvän tarkkuus on huomattavan paljon pienempi. Lopuksi kerätty opetuskuvasarja annettiin tutkimusyksikön käyttöön ja sillä testattiin alustavasti neuroverkkopohjaisen luokittelijan opetusta. Algoritmin opetus onnistui, mutta luokittelijan tarkkuutta ei vielä määritelty.

Laitteiston kehityksen seuraava vaihe on kunnollisen kuvasarjan keräys, jota käytetään oikeaan jyvien luokittelualgoritmin opetukseen. Tavoitteena olisi opettaa toimiva luokittelija, joka kykenee erottamaan jyvät luotettavasti toisistaan. Testien perusteella kuvasarjojen keräys on nyt helppoa, mutta laitteiston prototyypissä on kuitenkin vielä jäljellä useita kehityskohteita ja siihen voidaan tehdä monenlaisia parannuksia.

Ensimmäisenä suosituksena olisi laitteiston turvallisuuden parantaminen. Laitteiston runkoon tulisi lisätä suojakatteet. Helpon käsiteltävyyden takaamiseksi suojat voisivat olla avattavia, jolloin niiden yhteyteen tulisi mahdollisesti lisätä turvarajakytkimet. Beckhoff-järjestelmään on mahdollista lisätä oikeaa turvalogiikkaa, jolloin rajakytkimet ja hätäpysäyttimet voidaan asentaa luotettavasti.

Seuraavana kehityskohteena ovat laitteiston ohjelmistoon liittyvät ominaisuudet ja rajapinnat. Tällä hetkellä järjestelmässä on pelkästään Beckhoffin ohjelmisto ja käyttöliittymä, joilla kuljettimia ohjataan. Beckhoff-käyttöliittymään olisi kuitenkin mahdollista luoda esimerkiksi python-rajapinnat. Pythonilla voidaan ohjata myös laitteistoon liitettyjä kameroita ja LED-valaisinta. Tässä vaiheessa myös kuvankeräys perustuu python-pohjaiseen ohjelmaan, joten käytännössä kaikki järjestelmän toiminnot olisi mahdollista yhdistää samaan python-ohjelmaan. Myös liipaisusignaalin tuottamista python-puolella olisi hyvä tarkastella, esimerkiksi kuvankaappausohjelmasta olisi mahdollista saada python-käsky, jolla valaisinta liipaistaan.

Laitteiston testikameran lisäksi laitteessa pitäisi testata muita kameroita. CMOS-kameran pitäisi olla varustettu ”global shutter”-tyyppisellä sulkimella. Järjestelmässä voisi keilla myös erilaisia CCD-kameroita, minkä lisäksi myös tavallisen web-kameran suorituskykyä kuvien keräykseen voisi testata. Järjestelmän liittäminen ulkopuoliseen tietokoneeseen on yksinkertaista ja eräänä ehdotuksena oli Nvidian Xavier NX -yksikön testaus kuvankeräyskoneena. Järjestelmään on mahdollista lisätä kohtalaisen vähäisillä muutostoimenpiteillä myös jonkinlainen fyysinen erottelulaite, esimerkiksi paineilmasuutin, joka puhalttaa määritellyjä jyviiä eri säiliöön. Tämä kuitenkin vaatii joitain uusia toimilaitteita, sekä liipaisusignaalin. Myöhemmissä vaiheissa järjestelmän konseptia voidaan soveltaa jopa täysin erilaisten kappaleiden käsittelyyn ja kuvaukseen.

8 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä oli tavoitteena suunnitella ja toteuttaa kuvadatankeräyslaitteiston prototyyppi, jolla otetaan kuvia eri jyvälajikkeista. Työhön sisältyi myös laitteiston testaus, jossa kerättiin kuvasarjat Suomessa yleisesti kasvatetuista viljalajikkeista. Työssä tutustuttiin prototyyppien suunnitteluun ja valmistukseen, ja erityisesti osien valmistus 3D-tulostamalla oli tärkeässä osassa työn toteutusta.

Työn teoriaosuus aloitettiin perehtymällä erilaisiin julkaisuihin liittyen kuvadatan keräykseen ja luokittelualgoritmeihin. Julkaisuissa keskityttiin erityisesti kuvien keräysmenetelmiin ja käytettyjen laitteiden ominaisuuksiin. Myös tutkimuksissa otettujen esimerkkikuvien yksityiskohtiin, sekä tutkimuksen tuloksiin kiinnitettiin huomiota. Lisäksi tutustuttiin yleisellä tasolla elintarviketeollisuuden lajittelulaitteiden rakenteeseen ja toimintaan. Julkaisuista ja lajittelulaitteista saatiin hyviä ideoinnin lähtökohtia, joista laitteen toimintaa ja rakennetta lähdettiin hahmottelemaan.

Laitteiston prototyypin suunnittelussa päätettiin käyttää perinteisiä tuotekehitysprosessin peruseriaatteita, joita käsiteltiin työn teoriaosassa. Tuotekehitysprosessia seurattiin työn toteutuksessa melko vapaalla tyylillä, mutta se antoi kuitenkin erittäin hyvän pohjan järjestelmän suunnitteluun. Myös 3D-tulostuksen teoriaan ja erityispiirteisiin tutustuttiin lyhyesti suunnittelun teorian yhteydessä.

Työssä perehdyttiin pintapuolisesti materiaalinkäsittelyyn ja erilaisiin kuljettimiin liittyvään teoriaan. Kuljettimia on olemassa suuret määrät erilaisia eri käyttötarkoituksiin ja niiden suunnitteluun on olemassa monenlaisia suunnitteluperiaatteita. Työssä käytiin läpi hihna- ruuvi- ja tärykuljettimiin liittyviä asioita, jotka vahvistivat laitteiston suunnittelun lähtökohtia.

Kuvadatankeräyslaitteistosta haluttiin tehdä automaattinen ja helppokäyttöinen. Työssä käytiin läpi erilaisten automaatiokomponenttien teoriaa, minkä ansiosta suunnitteluvaiheessa pystyttiin tekemään perusteltuja päätöksiä komponenttien valintaan. Automaatio-teoriassa tutustuttiin lyhyesti erityisesti teollisuuskäyttöön tarkoitettujen ohjausjärjestelmien ja logiikoiden komponentteihin, erityispiirteisiin ja käyttöön, sekä ohjelmointiin.

Laitteistolla otetaan kuvia, joten automaatio-osuudessa käytiin läpi myös kameroihin, kuvaukseen ja valaistukseen liittyviä asioita. Lopuksi teoriaosassa käytiin läpi lyhyesti erilaisten sähkömoottorityyppien rakenteeseen, valintaan ja ohjaukseen liittyviä asioita.

Laitteiston toteutus aloitettiin suunnitteluvaiheella, jossa noudatettiin tarpeen mukaan tuotekehitysprosessiin periaatteita. Työn teoriaosuudessa käydyt asiat toimivat suunnitteluprosessin pohjana ja ne muodostivat osaltaan tuotekehitysprosessin esitutkimuksen. Laitteiston rakenteesta ja toiminnasta tehtiin erilaisia luonnoksia ja samalla myös perehdyttiin tarkemmin 3D-tulostuksen käytäntöön. Suunniteltavista kuljettimista tehtiin tarpeen mukaan alustavia testausprototyyppejä, joiden perusteella voitiin tehdä valintoja toimilaitteisiin liittyen. Kuvausjärjestelmälle laadittiin vapaamuotoinen vaatimuslista, joka sisälsi kiinteät ja vähimmäisvaatimukset, sekä laitteiston toimintaan liittyvät toivomukset. Luonnostelujen ja vaatimuslistan perusteella järjestelmälle laadittiin toimintorakenne, jonka perusteella aloitettiin eri osatoimintojen ratkaisuperiaatevaihtoehtojen etsiminen.

Laitteiston osakomponentit valittiin vaatimusten ja luonnosteluvaiheen testauksien tuloksena. Laitteistoon suunniteltiin ja valmistettiin omavalmistettiset ja pienikokoiset materiaalinkäsittelyn toimilaitteet, joihin kuuluivat ruuvisyötin ja säiliö, sekä täry- ja hihnakuljetin. Laitteistossa päädyttiin käyttämään Beckhoff-ohjausjärjestelmää, johon kuuluivat esimerkiksi IPC ja logiikkakortit. Ohjauskomponentit ja muut sähköosat sijoitettiin ohjauskeskukseen. Järjestelmässä käytettiin tässä työssä The Imaging Sourcen kameraa ja Latab LED-valaisinta. Järjestelmän komponentit asennettiin alumiiniprofiileista kasattuun runkoon. Laitteiston ohjausohjelma ja käyttöliittymä toteutettiin TwinCAT-ohjelmistolla.

Laitteistoa testattiin keräämällä testikuvasarjat kaurasta, vehnästä, rukiista ja ohrasta. Jokaisesta lajikkeesta kerättiin noin 5000 kuvaa. Testien perusteella järjestelmä todettiin työn tavoitteisiin nähden toimivaksi. Testikuvasarjat annettiin myös eteenpäin konenäköalgoritmien opetukseen, mutta vielä tässä vaiheessa luokittelijan suorituskyyvylle ei saatu tuloksia. Palautteen mukaan kerätty kuva-data soveltui kuitenkin hyvin konenäön opetukseen. Laitteiston jatkokehityskohteina ovat turvallisuuteen ja yleiseen toimintaan liittyvät parannukset, kuten ohjelmiston rajapintojen lisääminen. Lisäksi suunnitelmissa olisi testata erilaisia kameroita ja muita datakeräyksen komponentteja.

9 LÄHDELUETTELO

Airila, M., Karjalainen, J.A., Mantovaara, U. Nurmi, L., Ranta, A. & Verho, A., 1985. Koneenosien suunnittelu 1 Perusteet. Porvoo: WSOY. 283 s. ISBN 951-0-13013-3

Azadeh, K., De Koster, R. & Roy, D., 2019. Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. *Transportation Science*, 53 (4), s. 917–945.

Badue, C., Guidolini, R., Carneiro, R.V., Azevedo, P., Cardoso, V.B., Forechi, A., Jesus, L., Berriel, R., Paixão, T.M., Mutz, F., de Paula Veronese, L., Oliveira-Santos, T. & De Souza, A.F., 2021. Self-driving cars: A survey. *Expert Systems with Applications*, 165

Blasco, J., Cubero, S., Gómez-Sanchís, J., Mira, P. & Moltó, E. 2009., Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*Punica granatum*) arils based on computer vision. *Journal of Food Engineering*, 90 (1), s. 27–34.

Boumans, G., 1985. Grain handling and storage. Amsterdam: Elsevier, 436 s. ISBN 978-0-444-60089-9

Bruun, M. & Hokkanen, M., 2016. Materiaalia lisäävä valmistus. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu, 57 s. ISBN 978-951-588-578-4

Bühler, 2021. SORTEX B Optical Sorter [verkkodokumentti]. Uzwil: Bühler Group. Saatavissa: https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/en/products/sortex_b_opticalsorter.html [viitattu 20.10.2021]. 11 s.

Cimbria, 2021. SEA Chromex Electronic Sorting [verkkodokumentti]. Thisted: A/S Cimbria. Saatavissa: https://www.cimbria.com/content/dam/public/grain-and-protein/cimbria/brochures/SEA_Chromex_GB.pdf [viitattu 20.10.2021]. 11 s.

Elica ASM, 2021. Vision Series [verkkodokumentti]. Argelato: Alica ASM S.r.l. Saatavissa: <https://elica-asm.com/product/vision/> [viitattu 20.10.2021]. 4 s.

Fayed, M. & Skocir, T., 1997. Mechanical conveyors – selection and operation. Basel: Technomic Publishing AG, 485 s. ISBN 978-1-56676-416-2

Guevara-Hernandez, F. & Gomez-Gil, J., 2011. A machine vision system for classification of wheat and barley grain kernels. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9 (3), s. 672–680.

Hornberg, A., 2017. *Handbook of machine and computer vision: the guide for developers and users*. Weinheim: John Wiley & Sons, 860 s. ISBN 978-3-527-41341-6

Horvath, J. & Cameron, R., 2020. *Mastering 3D Printing: A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping*. 2. painos. Berkeley: Apress. ISBN 978-1-4842-5842-2

Keinänen, T. & Sumujärvi, M., 2019. *Automaatiotekniikka*. Helsinki: Sanoma Pro Oy. ISBN 978-952-63-4844-5

Koivisto, K., 2017. *Kuljetintekniikka*. Helsinki: BoD - Books on Demand. ISBN 978-951-568-666-4

Mebatsion, H., Paliwal, J. & Jayas, D., 2013. Automatic classification of non-touching cereal grains in digital images using limited morphological and color features. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, s. 99–105.

Meier, K., 2020. *The Basics of Stepper Motors* [verkkodokumentti]. Digi-Key Electronics. Saatavissa: <https://www.digikey.fi/fi/blog/the-basics-of-stepper-motors> [viitattu 26.10.2021].

Nivelco, 2018. *Nivelcon tuotteet* [verkkodokumentti]. Pirkkala: Labkotec Oy. Saatavissa: https://www.nivelco.com/public/files/documents/771cf9ea-362f-489a-985b-68239f82d02c/leveg18f0635b_FI.pdf [viitattu 15.3.2021] 12 s.

Noorani, R., 2006. *Rapid prototyping – principles and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons. 377 s. ISBN 978-0-471-73001-9

Pearson, T., 2009. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69, s. 12–18.

Pearson, T., Brabec, D. & Haley, S., 2008. Color image based sorter for separating red and white wheat. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2 (4), s. 280–288.

Pietikäinen, M. & Silvén, O., 2019. Tekoälyn haasteet – koneoppimisesta ja konenäöstä tunnetekoälyyn. Oulu: Oulun yliopisto, Konenäön ja signaalianalyysin keskus. 253 s. ISBN 978-952-62-2482-4

Sabanci, K., Kayabasi, A. & Toktas, A., 2017. Computer vision-based method for classification of wheat grains using artificial neural network. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97 (8), s. 2588–2593.

Satake Europe, 2021. Optical Sorter – Pikasen Alpha Plus [verkkodokumentti]. Bredbury: Satake Europe Ltd. Saatavissa: <https://www.satake-europe.com/product/pikasen-alpha> [viitattu 20.10.2021].

The Imaging Source, 2021. DFK Z12GX236 – GigE color zoom camera. Bremen: The Imaging Source Europe GmbH. Saatavissa: <https://www.theimagingsource.com/products/zoom-autofocus-cameras/gige-color-zoom-cameras/dfkz12gx236/> [viitattu 2.11.2021].

Zapotoczny, P., 2011. Discrimination of wheat grain varieties using image analysis and neural networks. Part I. Single kernel texture. *Journal of Cereal Science*, 54, s. 60–68.